centre
d'Etudes
techniques
maritimes
et fluviales

Pathologies des ouvrages portuaires : méthodes d'investigation



Notice n° P 08-02
Septembre 2008



AVANT-PROPOS

Ce guide, élaboré principalement par l'équipe de recherche associée « durabilité des infrastructures portuaires maritimes » du CETE de l'Ouest, présente les méthodes d'investigation pratiquées par le réseau technique du MEEDDAT qui peuvent être utilisées en cas de découverte de désordres sur des infrastructures portuaires. Certaines méthodes peuvent également servir à détecter des désordres dans le cadre de la gestion du patrimoine.

S'ils ne sont pas traités assez tôt, les désordres peuvent empêcher les ouvrages d'assurer certaines fonctions pour lesquelles ils ont été dimensionnés. Les investigations permettent, dans la majorité des cas, de déterminer leurs causes. En effet, les réparations des désordres ne doivent pas se contenter de restaurer l'ouvrage en apparence. Elles doivent surtout s'attacher à faire disparaître les causes de ces désordres.

Le guide est constitué d'un texte principal et de fiches.

- Les premières proposent, par type d'ouvrage, une cotation des méthodes d'investigation en fonction de leur pertinence et de leur efficacité pour apprécier les différents désordres possibles et leurs causes.
- Les deuxièmes décrivent les méthodes d'investigation les plus importantes et les plus fréquentes.

Ce guide a pour objet d'aider les autorités portuaires ou leurs maîtres d'œuvre à choisir les méthodes d'investigation les plus appropriées à leur problème. Il ne traite pas de l'interprétation des données issues de ces investigations, ni de l'utilité de constituer des bases de données propres à une bonne gestion du patrimoine portuaire.

Le lecteur est invité à faire part de toute remarque ou suggestion afin d'améliorer ce recueil de bonnes pratiques, issu de l'expérience propre au réseau scientifique et technique.

Le Directeur du CETMEF

Geoffroy CAUDE

COMITÉ DE RÉDACTION ET DE RELECTURE

La rédaction de ce document a été assurée par :

- Benoît THAUVIN — CETE de l'Ouest, LRPC de Saint-Brieuc
- Nicolas ROUXEL — CETE de l'Ouest, LRPC de Saint-Brieuc

Ont participé à son élaboration :

- Catherine CHAULIAGUET — CETE de l'Ouest, LRPC de Saint-Brieuc
- Reynald FLAHAUT — CETE de l'Ouest, LRPC de Saint-Brieuc
- Jean-Noël LASBLEIZ — CETE de l'Ouest, LRPC de Saint-Brieuc
- Michel MENGUY — CETE de l'Ouest, LRPC de Saint-Brieuc
- Laurent RIOU — CETE de l'Ouest, LRPC de Saint-Brieuc
- Aldéric HAUCHECORNE — CETMEF

Relecteurs :

- Joël BANNEAU — CETE du Sud-Ouest, LRPC de Bordeaux
- Thierry DUBREUCQ — CETE du Sud-Ouest, LRPC de Bordeaux
- Laurent LABOURIE — CETE Nord Picardie, DOA
- Michel LAUDE — CETE de l'Ouest, DOA
- Guillaume VEYLON — CETE Méditerranée, LRPC d'Aix

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 PROBLEMATIQUE

1.1.1 Généralités

Une partie importante du patrimoine des infrastructures portuaires est constituée d'ouvrages construits il y a longtemps et les gestionnaires d'infrastructures portuaires sont confrontés à un nombre important d'ouvrages présentant différents types de dégradation.

Les gestionnaires d'infrastructures portuaires doivent maintenir le niveau de service des ouvrages pour respecter les exigences de leurs utilisateurs. Ils sont donc amenés à définir, programmer et réaliser des interventions d'entretien, de réparation ou de confortement d'ouvrages qui peuvent parfois être lourdes et coûteuses, surtout en cas d'improvisation.

Face à une dégradation donnée, les gestionnaires sont souvent démunis pour définir l'action adéquate (perte d'archives, de constats d'entretien, etc…). En effet, l'action à mettre en œuvre pour traiter un désordre ne dépend pas uniquement du désordre lui-même, car elle n'a d'intérêt que si elle s'attaque aussi à ses causes.

Une étape intermédiaire entre le constat visuel de la dégradation (ou des conséquences de la dégradation) et la mise en œuvre d'une action est donc primordiale : c'est l'étape de diagnostic. Ce dernier permet d'expliquer le désordre et de définir un traitement pertinent de celui-ci. Le diagnostic s'appuie sur un certain nombre d'outils que nous appelons « méthodes d'investigations » dans le présent guide.

1.1.2 Objectifs du guide

Les ouvrages portuaires sont complexes en raison de la grande variété des types de structure et des modes de construction. L'agressivité liée au milieu maritime et à l'utilisation qui est faite des ouvrages induit des modes et des cinétiques de rupture et de dégradation spécifiques.

De plus, ces ouvrages présentent souvent des conditions et des contraintes d'accès difficiles : le choix des méthodes d'investigation doit donc tenir compte de tous ces éléments.

Le présent guide est un outil destiné aux maîtres d'ouvrage portuaires, à leurs services ou à leurs maîtres d'œuvre pour :

- connaître et comprendre les différentes méthodes d'investigation,
- sélectionner les méthodes d'investigation adaptées aux pathologies qu'ils rencontrent sur leurs ouvrages,
- aider à définir un plan d'investigations,
- juger la pertinence des investigations qui leur sont proposées,
- orienter le choix des actions préventives ou curatives à mettre en œuvre.

1.2 CHAMPS D'APPLICATION DU GUIDE

Le présent guide s'applique aux infrastructures portuaires. Il s'intéresse à la fois aux structures, aux matériaux constitutifs et au sol de fondation des ouvrages.

Ce document s'adresse d'une façon générale aux maîtres d'ouvrages portuaires, aux maîtres d'œuvre, mais aussi aux laboratoires ou aux bureaux d'études qui commandent, définissent, encadrent ou réalisent le diagnostic d'un ouvrage portuaire.

1.3 CONTENU ET MODE D'EMPLOI

Le guide s'articule autour de deux notions :

- la notion d' « ouvrage » : un ouvrage est caractérisé par des modes de rupture et une cinétique de dégradation spécifiques,
- la notion de « méthode » : une méthode est une technique d'investigation qui, seule ou combinée à d'autres méthodes, fournit des éléments objectifs permettant de formuler le diagnostic.

Ces deux notions conduisent à proposer une double entrée : une entrée par typologie de l'ouvrage avec l'utilisation des « fiches ouvrage » et une entrée par la méthode d'investigation grâce aux « fiches méthode ». Des renvois permettent de passer d'une approche à l'autre et de croiser les analyses.

La liste des ouvrages et des méthodes cités dans ce guide n'a pas la prétention d'être exhaustive. L'attention du lecteur est attirée sur le fait que l'autorité portuaire ne peut s'affranchir de l'assistance de spécialistes en géotechnique et en ouvrage d'art, pour le choix et la définition du plan d'investigations.

L'ouvrage et son environnement

Les types d'ouvrage
- Structures
- Modes de construction
- Nature des fondations
- Nature des matériaux

Environnement des ouvrages
- Agressivité du milieu
- Utilisation des ouvrages

Les phénomènes mis en jeu

Modes et cinétiques de rupture et de dégradation des structures et des sols ou roches autour de la structure : pathologies

Objet du guide

Les outils pour comprendre

Conditions et contraintes d'accès aux structures

Méthodes d'investigations adaptées portant sur :
- Le matériau constitutif
- Le fonctionnement mécanique et hydraulique
- La vie de l'ouvrage

L'analyse et l'explication

Formulation d'un diagnostic :
- Origine des désordres
- Ampleurs des désordres
- Gravité des désordres
- Evolution probable des désordres
- Proposition de suites à donner

Le traitement

Actions, traitements
- Entretien
- Réparation
- Confortement
- Surveillance

<u>LOGIGRAMME DE RÉPONSE À UN DÉSORDRE</u>

2. LES INVESTIGATIONS DANS LA CHAINE DU DIAGNOSTIC D'UN OUVRAGE PORTUAIRE

On entend par ouvrage portuaire, l'ensemble constitué par la structure de génie civil et le sol autour (exemple : un mur de quai, le terre-plein arrière et le fond du bassin avant).

2.1 INVESTIGATIONS ET DIAGNOSTIC

Une inspection détaillée peut être initiée par le souhait du gestionnaire d'infrastructures portuaires de connaître l'état de son ouvrage suite à un événement particulier (tempête, choc, évolution des sollicitations, etc…) : il s'agit dans ce cas de dresser un « bilan de santé ».

Elle peut également résulter d'une visite d'un parc d'ouvrages dans le cadre d'une surveillance systématique de celui-ci.

Une telle inspection permet de déceler d'éventuels désordres. Quand un désordre est constaté, des investigations permettent de recueillir des informations de nature à l'expliquer. L'interprétation de ces informations constitue le diagnostic.

La formulation d'un diagnostic nécessite donc la mise en place d'un programme d'investigations permettant d'accéder à des informations latentes. Le choix des investigations est fondamental et dépend :

- des besoins du gestionnaire de l'ouvrage,
- du niveau de fiabilité du dossier d'ouvrage,
- du type d'ouvrage,
- de l'environnement de l'ouvrage,
- de la nature et de l'ampleur des désordres constatés.

L'étape préalable à toute investigation dans le cadre d'un diagnostic est l'examen du dossier d'ouvrage.

2.2 CRITERES DE SELECTION DES INVESTIGATIONS

Le choix des investigations est réalisé par le biais de cinq critères :

2.2.1 Les besoins du gestionnaire

Le gestionnaire de l'ouvrage portuaire peut rencontrer trois situations :

- Il souhaite connaître l'état de son ouvrage à un instant donné. Il s'agit donc de réaliser un « bilan de santé » à titre préventif.
- Dans le cadre de la surveillance, des désordres qui affectent le niveau de service ont été détectés sur un ouvrage. Avant d'engager des travaux, le gestionnaire souhaite donc connaître l'origine de ces désordres pour définir des solutions de traitement adaptées.
- Dans le cadre de la surveillance, des désordres ont été détectés sur un ouvrage. Ils n'affectent pas le niveau de service mais leur origine n'est pas connue, ni leur ampleur, et le gestionnaire souhaiterait connaître leur niveau de gravité et éventuellement leur potentiel d'évolution.

Selon le cas envisagé, les investigations pourront être plus ou moins complexes, plus ou moins ciblées et plus ou moins précises.

2.2.2 La fiabilité du dossier d'ouvrage

Il est indispensable de disposer d'un dossier d'ouvrage afin d'avoir :

- les éléments de dimensionnement (notes de calculs, charges d'exploitation, etc…),
- les plans de récolement ou à défaut les plans d'exécution,
- l'historique des changements des conditions d'exploitation (évolution du niveau de service de l'ouvrage, dragage, surcharges, rehaussement du quai, etc…),
- les opérations d'entretien avec leurs périodicités,
- les réparations, etc…

Le dossier d'ouvrage est un document vivant qui doit être mis à jour régulièrement.

2.2.3 Le type d'ouvrage

La typologie de l'ouvrage s'appuie en premier lieu sur l'identification de la structure. L'objectif est de déterminer :

- Le fonctionnement mécanique et hydraulique de l'ouvrage : s'agit-il d'un soutènement de type ouvrage poids ou de type paroi de soutènement ? La géométrie et les conditions aux limites de la fondation sont-elles connues à ce stade (fondations, nature du sol support, etc…) ? Quel est le fonctionnement hydraulique (piézomètre, dénivelée hydraulique, circulation d'eau interne) ?
- Le matériau constitutif de la structure: s'agit-il de béton armé, de béton précontraint, de métal ou de maçonnerie ?

En second lieu, il convient d'identifier le mode de construction : s'agit-il d'une structure en béton préfabriquée ou coulée en place ? Quel a été le phasage de construction ?

L'objectif est de déterminer :

- Le phasage de construction : la connaissance précise du phasage de construction permet de réaliser des expertises plus rigoureuses.
- La géométrie : quelle est la géométrie réelle de l'ouvrage ? La réponse à cette question peut nécessiter des levés complémentaires préalables si les plans sont douteux ou inexistants.
- L'époque de construction : c'est une information utile car elle renvoie souvent à un type de pathologie répertorié, qu'il s'agisse du mode de conception ou de la qualité des matériaux.

Enfin, l'analyse des interactions sol/structure (au niveau de la fondation et/ou du soutènement) et des problèmes hydrauliques (poussée sur les soutènements) est primordiale pour comprendre le fonctionnement des ouvrages portuaires. Il est nécessaire de connaître le mode de fondation et les caractéristiques géotechniques et hydrauliques du sol.

> La connaissance de la structure, de son époque de construction et de son mode de fonctionnement (interaction sol/eau/structure) permet d'orienter l'implantation des investigations. Elle permet également de faire un diagnostic sommaire sur les mécanismes de dégradation. Ce dernier aidera pour le choix de la nature de l'investigation.

2.2.4 L'environnement de l'ouvrage

L'environnement maritime est un milieu très fortement agressif pour les ouvrages portuaires. De l'exposition et des conditions d'utilisation des ouvrages dépendent la nature et la cinétique de leur dégradation :

- zone constamment immergée,
- zone de marnage,
- zone exposée aux embruns,
- zones exposées aux chocs,
- zones de sollicitation, etc…

Les différentes expositions et les différentes utilisations de la structure permettent de définir les différentes zones d'investigations et l'allotissement des contrôles. Les contraintes liées à l'accessibilité et à la configuration des lieux peuvent également déterminer la nature et le nombre des investigations.

2.2.5 La nature et l'ampleur des dégradations

Dans la plupart des cas, le gestionnaire d'infrastructures portuaires dispose d'un constat qui décrit les désordres apparents et leur étendue. L'analyse de ce document permet de formuler un certain nombre d'hypothèses sur les origines des dégradations, mais cette approche visuelle n'est pas suffisante pour formuler un diagnostic définitif. La mise en relation de ces désordres avec l'identification de la structure permet d'éliminer un certain nombre d'hypothèses. Ce premier filtrage permet de concentrer les investigations sur les hypothèses encore crédibles.

De plus la connaissance de l'évolution des dégradations (par exemple corrosion, déplacements, déformations, etc…) permet d'affiner l'expertise et/ou de relier certains désordres à des évènements précis. Cette connaissance permet, le cas échéant, aussi de relativiser les risques d'évolution défavorable.

NB : il pourra être intéressant de se reporter le cas échéant aux guides techniques publiés par le CETMEF : « ***Surveillance, auscultation et entretien des ouvrages maritimes*** » et aux guides techniques publiés par le LCPC : « ***Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic*** » du type d'ouvrage concerné.

2.3 LE PROGRAMME D'INVESTIGATIONS

Après avoir défini ses besoins, examiné le dossier d'ouvrage, déterminé le type d'ouvrage, examiné son environnement, déterminé la nature et l'ampleur des dégradations, le gestionnaire d'infrastructures portuaires définit le programme d'investigations.

Celui-ci doit contenir :

- la nature et le phasage des différentes investigations,
- l'implantation des zones d'investigations,
- le nombre de contrôles par zones,
- la nature et la précision des résultats attendus,
- l'exposé des critères qui justifient l'engagement d'une investigation au regard des résultats des investigations précédentes,
- les référentiels techniques, les normes et les procédures utilisés,
- les différents intervenants (rôle et organisation, sous-traitance),
- les moyens matériels et humains.

3. LES FICHES OUVRAGES

3.1 CONTENU

Chaque fiche comporte cinq parties :

3.1.1 Description de l'ouvrage

La description de l'ouvrage permet d'estimer la période de construction, la géométrie, la constitution probable et éventuellement le mode de construction.

Pour les ouvrages portuaires, l'interaction « sol/structure » et les problèmes hydrauliques sont fondamentaux. La « fiche ouvrage » présente donc les types de fondation susceptibles d'être rencontrés pour l'ouvrage concerné.

Le fonctionnement global de l'ouvrage montre comment les efforts sont repris et par quel(s) principe(s) mécanique(s) la stabilité et la résistance sont assurées.

La zone d'influence est la zone dans laquelle les effets d'interaction sol/structure sont non nuls (sol de fondation, sol soutenu, limites de perturbation des écoulements internes).

Enfin, une photo associée à une coupe type d'ouvrage permet d'illustrer la description des fonctions porteuses et/ou de soutènement de l'ouvrage. Il faut bien insister sur le fait que certaines déformations, parfois impressionnantes, sont normales et que, largement stabilisées, elles n'affectent pas les performances de l'ouvrage.

3.1.2 Variantes de l'ouvrage

Cette partie présente les variantes dont l'ouvrage a pu éventuellement faire l'objet. Les variantes concernent en général des modes de construction ou des géométries particulières. Des photos peuvent éventuellement illustrer les différentes variantes.

3.1.3 Modes de dégradation ou de ruine

Les modes de dégradation ou de ruine sont directement liés à la structure de l'ouvrage. Le fonctionnement mécanique permet d'identifier les modes de rupture alors que le matériau constitutif permet de connaître les modes d'altération et éventuellement la cinétique de dégradation. Cette partie est complétée par un tableau qui met en relation pour chaque type de désordre potentiellement observable, les causes dont la recherche est à privilégier. Chaque famille de causes est affectée d'un « code » qui permet de se reporter au tableau de la quatrième partie.

3.1.4 Tableau croisé : pertinence et choix des investigations

Pour chaque cause possible de désordre, le tableau donne le niveau de pertinence des investigations possibles dans le cadre d'un diagnostic de pathologie. Le niveau de pertinence est donné par le nombre de symboles.

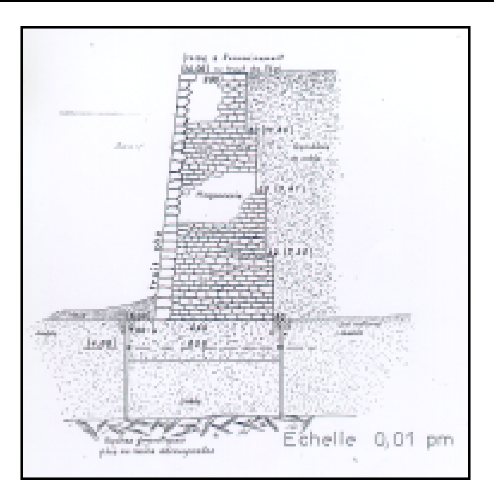
Diagnostic de rupture ou de pathologie	Pertinence de la méthode d'investigation
	Inadaptée
●	Adaptée sous réserve d'être associée à une autre méthode
●●	Adaptée
●●●	Indispensable

3.1.5 Instrumentation et suivi

Certaines pathologies à évolution lente peuvent nécessiter la mise en place d'un suivi, pour affiner le diagnostic, appréhender la cinétique de dégradation ou bien encore définir des seuils d'alerte et/ou d'intervention. La périodicité du suivi devra être définie au cas par cas. Ce guide ne traite pas de la politique de surveillance des ouvrages mise en place par le gestionnaire d'infrastructures portuaires.

3.2 EXEMPLE

FICHE OUVRAGE : MUR POIDS EN MACONNERIE



1) Description de l'ouvrage :

- Définition de la structure :

Ouvrages construits entre le 17ème siècle et le début du 20ème siècle. Ces murs peuvent atteindre une quinzaine de mètres de hauteur. La maçonnerie de revêtement ou de parement est le plus souvent en pierre de taille alors que le corps du mur en arrière du parement est en général en maçonnerie de moellons ordinaires non appareillés ou en « maçonnerie de béton » (béton cyclopéen). Le parement côté mer présente généralement un fruit. Le parement côté massif soutenu peut être constitué de plusieurs redans.

- Types de fondations :

Plusieurs types de fondations peuvent être rencontrés selon l'époque de construction et les caractéristiques mécaniques du sol de fondation (liste non exhaustive) :

- fondation sur pieux en bois enserrés dans un massif de béton,
- fondation sur platelage en bois,
- semelle en béton.

- Fonctionnement global :

Le mur poids en maçonnerie a pour fonction le soutènement des terres. L'effort de poussée exercé par le massif de terre soutenu est entièrement repris par le poids propre de l'ouvrage. On dit qu'il s'agit d'un mur gravitaire, c'est-à-dire que sa stabilité résulte de sa propre masse. Il est considéré auto-stable.

- Zone d'influence :

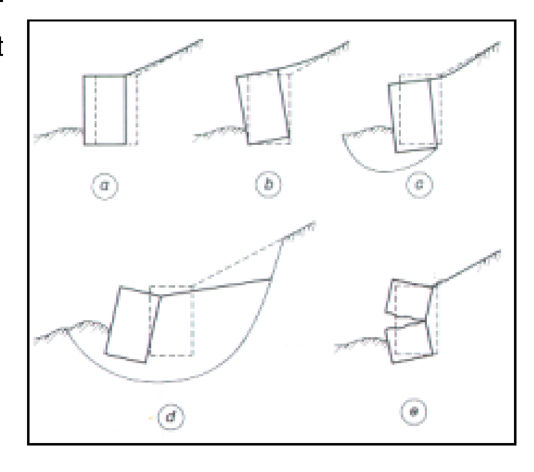
La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrinsèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage :

Les variantes concernent exclusivement la géométrie transversale (fruits, redans). Certains ouvrages ont pu être confortés selon différentes techniques (tirants, micro-pieux). L'appareillage de la maçonnerie peut varier d'un ouvrage à l'autre : assise régulière ou irrégulière, moellons ordinaires ou pierre de taille. L'attention est attirée sur le fait qu'au cours de leur vie les ouvrages ont pu être modifiés (superposition de plusieurs structures par exemple) ce qui peut rendre l'expertise plus délicate.

Remarque : certains murs poids en béton sont parés d'un appareillage en maçonnerie, ce qui peut porter à confusion.

3) Modes de dégradation ou de ruine



- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Glissement de l'ouvrage sur sa base (a)
- Renversement de l'ouvrage (b)
- Poinçonnement du sol de fondation (c)
- Grand glissement englobant l'ouvrage (d)
- Tassements différentiels

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Rupture de l'appareillage de maçonnerie (e)
- Altération des pierres de maçonnerie
- Altération du mortier

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Disjointoiement	Altération du mortier due à l'action mécanique de la mer	A
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
Gonflement du parement	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
Fissures et / ou fractures verticales ou inclinées dans le parement (avec ou sans rejet)	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	D
	Affouillements	E
Fissures et / ou fractures horizontales dans le parement (avec ou sans rejet)	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
Désorganisation de la maçonnerie, cavités ou lacunes dans le parement	Action mécanique de la mer (altération des pierres de maçonneries, etc.)	A
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
	Actions accidentelles (chocs, amarrages, etc.)	F
Fissuration du terre-plein parallèle au couronnement, affaissement, flaches dans le terre-plein	Renversement du mur	G
	Affouillement	E
	Fuite de matériaux par le parement (voir disjointoiement, cavités)	H
	Grand glissement	K
dégarnissage du système de fondation	Affouillement	E
	Dragage excessif	E
Renversement	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	C
	Poinçonnement du sol de fondation	J
	Actions accidentelles (chocs, amarrages, etc.)	F
Glissement de l'ouvrage sur sa base	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	C

Exemple de tableau croisé :

POUR LE DIAGNOSTIC

Niveau de pertinence : Selon le nombre de symboles

Type d'investigation			Causes possibles									
			A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
			Altération du mortier due à l'action mécanique de la mer	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Affouillements	Actions accidentelles (chocs, etc.)	Renversement du mur	Fuite de matériaux par le parement	Poinçonnement du sol de fondation	Grand glissement
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	•	•	•	•	•	••	••	•	•	•
		Inspection « subaquatique »	•	•	•	•	••	••	•	•••	•	•
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques		•						•		
		Endoscopie		•						•		
		Bathymétrie					••					•
	Contrôles destructifs	Essais de compression sur carottes	•	••								
		Analyse physico-chimique du mortier		•••								
		RQD		••						••		
		Piézomètre		•	•••				•••	•	•	••
		Pressiomètre			•	••			••		••	•
		Pénétromètre			•	•					•	•
		Essais Lugeon		••						•		
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol			•••	••			••		•	•••
	Etudes	Dossier d'ouvrage		•	••	•	••	••	••		••	••
		Re-calcul			••	•	•	•	••		••	••

POUR LE SUIVI

	Désordres					
Instrumentation Suivi	Fissures et / ou fractures verticales, horizontales ou inclinées	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Renversement du mur et/ou glissement sur sa base Grand glissement	Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Gonflement de maçonnerie	Disjointoiement, désorganisation de maçonnerie, cavités
Distancemétrie			••		•	
Inclinométrie			•••		••	
Capteur de déplacement, fissurométrie	•••	••				
Nivellement x, y, z		•••	•	••		
Piézométrie	•	•	••			
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)		•••				
Profils laser, profils au fil à plomb,…			••		•••	
Bathymétrie				•••		
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)	••	•		•••	•	•••
Suivi photographique	•		•	••		•••

3.3 Identification des ouvrages

Les ouvrages identifiés sont les suivants :

Murs poids en maçonnerie	**Fiche Ouvrage n°1**
Mur poids (ou blocs) en béton	**Fiche Ouvrage n°2**
Voile en béton armé encastré sur semelle	**Fiche Ouvrage n°3**
Rideau de palplanches (tiranté ou non)	**Fiche Ouvrage n°4**
Paroi moulée (tirantée ou non)	**Fiche Ouvrage n°5**
Quai sur pieux	**Fiche Ouvrage n°6**
Talus perreyé en maçonnerie ou en enrochement	**Fiche Ouvrage n°7**
Gabions de palplanches	**Fiche Ouvrage n°8**
Caisson en béton armé	**Fiche Ouvrage n°9**
Digue à talus en enrochement naturel ou artificiel	**Fiche Ouvrage n°10**

Remarque : La présente liste n'est pas exhaustive. Elle pourra être complétée ultérieurement.

4. LES FICHES METHODES

Remarque préalable : Les fiches se veulent synthétiques pour que le lecteur appréhende le plus rapidement possible les méthodes. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter aux références bibliographiques et normatives en fin de chaque fiche.

4.1 CONTENU

Chaque fiche comporte sept parties :

4.1.1 Généralités

La fiche indique le nom commun de la méthode et son principe. Elle explique éventuellement le phénomène physique sur lequel la méthode est fondée. Le domaine d'application correspond à l'ensemble des problèmes que la méthode permet de traiter et précise son objectif.

4.1.2 Mode opératoire

Le mode opératoire précise les modalités d'allotissement des essais, les conditions particulières d'intervention, le phasage des différentes opérations et le matériel nécessaire.

4.1.3 Domaine de validité

Cette partie identifie les paramètres qui pourraient influencer les résultats de l'investigation, l'ensemble des contre-indications et précise éventuellement la sensibilité et la précision des résultats obtenus.

4.1.4 Investigations complémentaires

La fiche précise également, les autres investigations auxquelles la méthode peut être associée et les données indispensables à l'interprétation des résultats.

4.1.5 Présentation et interprétation des résultats

Cette partie précise les informations que doit contenir le compte rendu de l'intervention. Elle précise en outre quels types de conclusion ou d'interprétation peuvent être tirées des résultats.

4.1.6 Prix

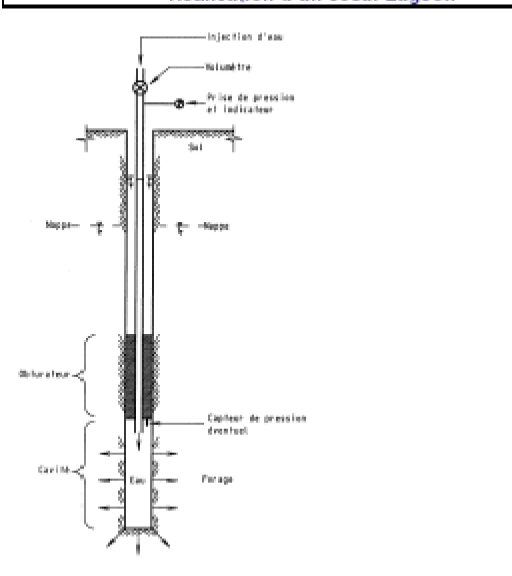
Cette partie doit aider le maître d'œuvre à élaborer son bordereau des prix et à juger la pertinence de la proposition financière d'un laboratoire spécialisé sachant que les contraintes d'accès peuvent contribuer largement à renchérir les interventions.

4.1.7 Références bibliographiques et normatives

Dans cette partie, sont recensés les principaux documents relatifs à la méthode considérée. Il peut s'agir de guides, de normes, de modes opératoires ou de règlements.

4.2 EXEMPLE

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un essai Lugeon



1) Nom de la méthode
Réalisation d'un essai Lugeon

2) Description : principe de la méthode
La présente méthode a pour objet d'évaluer in-situ la possibilité de circulation d'eau dans le sol et à déceler des hétérogénéités ou des fissurations.
Il consiste à injecter de l'eau sous pression dans une cavité constituée d'une portion de forage de dimensions connues, et à mesurer le débit d'injection pour différents paliers de pression, pendant un temps donné.

3) Domaine d'application
L'essai Lugeon s'applique au rocher et aux sols cohérents de résistance mécanique compatible avec la pression d'eau imposée pendant l'essai.

4) Mode opératoire :
Généralités :
- L'essai est généralement réalisé dans un forage à l'avancement.
- Les points de sondage sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (opérateur, date, numéro de dossier, cote de l'essai, niveau piézométrique….) sont notées.
- L'essai d'eau Lugeon consiste à :
  - réaliser à l'intérieur du sol, par extraction, une cavité à la base d'un forage, puis à relier cette cavité à la surface du sol par un tube d'injection. La cavité est constituée d'une portion de forage comprise entre le fond et d'un obturateur qui la limite en partie haute,
  - produire et maintenir constante une charge hydraulique à l'intérieur de la cavité en injectant de l'eau sous des paliers de pression croissante puis décroissante (0,2 MPa – 0,4 MPa - 0,6 MPa – 0,8 MPa – 1,0 MPa puis 0,7 MPa – 0,5 MPa – 0,3 MPA et 0,1 MPa)
  - mesurer le volume injecté dans la cavité toutes les minutes.

Matériels :
- Matériel de forage
- Système d'obturation
- Dispositif d'injection d'eau
- Système de mesurage

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)
- Les essais réalisés doivent être représentatifs de la zone à étudier.
- L'essai Lugeon ne s'applique pas aux sols meubles de faible cohésion.
- Dans le cas de massifs déjà fragilisés (maçonnerie…), la pression d'injection sera à adapter pendant l'essai afin de ne pas les endommager davantage.

4.3 IDENTIFICATION DES METHODES

Il été identifié quatre grandes catégories de méthodes d'investigation :

Catégorie	Désignation	Description
1	Inspection et visite	L'investigation est visuelle. Elle peut être aérienne ou subaquatique
2	Contrôle destructif	Elle suppose des prélèvements de matériau ou d'échantillons dans ou sur l'ouvrage
3	Contrôle non destructif	Par opposition au contrôle destructif, l'investigation ne porte pas atteinte à l'intégrité de l'ouvrage. Elle nécessite un matériel spécifique.
4	Etude	L'investigation porte sur le dossier d'ouvrage ou sur les archives. Il peut également s'agir d'un recalcul.

Voici une liste non exhaustive des principales méthodes d'investigation utilisées pour diagnostiquer des désordres dans la structure d'ouvrages portuaires. Dans le présent guide, seules quelques méthodes font l'objet d'une fiche.

Domaine	Contrôle non destructif	Contrôle destructif
Métal	Mesures d'épaisseur résiduelle de tôles Dureté Ultrasons Radiographie Magnétoscopie Ressuage Mise en évidence d'une bio-corrosion	Résilience Traction Analyse métallographique Agressivité des sols et de l'eau de mer
Protection anticorrosion	Mesure résiduelle d'épaisseur de revêtement Aspect (état de surface – couleur…) Préparation de surface avant remise en peinture Mesure du potentiel d'électrode à l'éponge (porosité) Essais préalables de décapage (travaux neufs)	Epaisseur (PIG) Adhérence par traction Quadrillage Porosité Mesure du potentiel d'électrode au balai électrique (porosité) Chlorures Essais préalables de décapage, avivage (maintenance)
Béton armé et précontraint	Auscultation sonique par transparence ou de surface RADAR Gammagraphie Potentiel d'armatures Potentiel d'armatures en zone immergée Vitesse de corrosion Perméabilité à l'air (BT CRIS) Indice de fissuration Ecoute acoustique sur câbles Position et enrobage des aciers	Profondeur de carbonatation Porosité à l'eau Masse volumique Compression Profils de chlorures Coefficient de diffusion des chlorures Analyse physico-chimique (micro-analyse, analyse minéralogique, examen au MEB,…) Essais de vieillissement accéléré Essais de fluorescence aux ions uranyles Prélèvement par sondage carotté pour examen visuel Ouverture de fenêtre pour examen d'éléments de précontrainte Mesure de tension à l'arbalète Dureté et homogénéité de surface d'un parement béton Homogénéité de surface ou dans la masse d'un béton
Sol et fondations	Détermination du RQD Mesure piézométrique (avec tube ouvert) Mesure piézométrique (avec sonde de mesure de pression interstitielle)	Essai préssiométrique Essai Lugeon Détermination de l'agressivité chimique des sols Essai pénétrométrique statique Essai au piézocône Carottage Essai de pénétration dynamique de type A Sondage au pénétromètre dynamique de type B Essai de cisaillement au phicomètre
Inspection, instrumentation et suivi	Inspection subaquatique Distancemètre à fil invar Inclinomètre Nivelle LPC	

5. EXEMPLE DE PLAN D'INVESTIGATIONS D'UN MUR POIDS EN MAÇONNERIES

5.1 CONTEXTE (DESCRIPTION DE L'OUVRAGE ET DES DESORDRES OBSERVES)

L'ouvrage considéré est un mur poids en maçonnerie de 100 m de long et de 10 m de hauteur construit à la fin du dix-neuvième siècle. En section courante, il présente un léger fruit en parement extérieur et des redans côté remblai.

En complément de sa fonction de soutènement du terre-plein (parking et passage piétons), l'ouvrage permet l'accostage et l'amarrage de bateaux de plaisance.

Depuis sa construction, l'ouvrage n'a jamais été suivi. Le gestionnaire, ayant mis en place une nouvelle organisation relative à la surveillance de son patrimoine, a découvert lors de la première visite d'inspection que l'ouvrage présentait les désordres suivants :

Bombement du parement localisé en zone marnante avec un déjointoiement important	
Défaut d'alignement en plan du couronnement	
Léger soulèvement du couronnement	
Flaches et affaissements généralisés du terre-plein associés à des fissures parallèles à l'ouvrage	
Quelques fissures verticales du parement	

Le gestionnaire de l'ouvrage n'a aucune information sur l'antériorité de ces désordres et souhaite connaître leur origine, leur gravité et les éventuelles solutions de traitement adaptées.

5.2 ANALYSE

Les besoins de l'autorité portuaire	- Le gestionnaire a besoin d'un diagnostic sur l'origine et la gravité des désordres que ses services ont observés lors de leur visite. - Ce diagnostic doit donner lieu si nécessaire à des préconisations de réparation, de confortement ou de surveillance.
Le type d'ouvrage	- L'ouvrage a été construit à la fin du dix-neuvième siècle : l'utilisation d'un mortier de chaux aérienne ou hydraulique est très probable (risque d'attaque du mortier par l'eau de mer). - L'ouvrage est fondé directement sur le substratum rocheux : les fissures verticales en parement n'ont donc pas pour origine un tassement différentiel dû à une altération ou à une insuffisance du système de fondation.
L'environnement de l'ouvrage	- La maçonnerie constitutive de l'ouvrage est exposée au cycle des marées (marnage de 5 m d'amplitude). Cet environnement maritime peut être à l'origine de dégradations spécifiques (formation d'ettringite). - Le pied de l'ouvrage ne découvre pas à marée basse : attention au risque d'affouillement et de formation de cavités. - Les surcharges en terre-plein sont très faibles et ne peuvent expliquer les flaches et les affaissements. Les défauts d'alignement en plan de même que le bombement du parement ne sont pas liés à une poussée excessive due aux surcharges d'exploitation. - Le gestionnaire indique la présence d'une canalisation d'eau dans le remblai à 2,5 m de profondeur.
La nature et l'ampleur des désordres	La visite a mis en avant des désordres globaux (bombement, défaut d'alignement) associés à des désordres locaux (flaches dans le terre-plein, fissures verticales, déjointoiement).

A ce stade de l'analyse, les hypothèses sont les suivantes :

- Hypothèse 1 : Poussée excessive du remblai expliquant le défaut d'alignement en plan et le bombement du parement.
- Hypothèse 2 : Affouillement en pied d'ouvrage expliquant les affaissements et flaches observés sur le terre-plein.
- Hypothèse 3 : Attaque chimique de la maçonnerie de remplissage (formation de sels de Candlot - ettringite) expliquant le bombement du parement et le léger soulèvement du couronnement.
- Hypothèse 4 : Altération de la maçonnerie de remplissage (vieillissement en environnement marin).

5.3 PROGRAMME D'INVESTIGATIONS

- Analyse des documents d'archive.
- Visite subaquatique du pied de l'ouvrage afin de détecter les cavités ou les affouillements.
- Recherche de fuite dans la canalisation avec un indicateur coloré.
- Réalisation d'un sondage carotté dans la zone présentant le bombement et le défaut d'alignement (« zone altérée ») et d'un sondage dans une zone saine (« zone témoin »).
- Réalisation d'essais Lugeon dans les deux sondages afin de qualifier la perméabilité de la maçonnerie de remplissage.
- Mesure du RQD sur les carottes extraites pour quantifier le niveau d'altération de la maçonnerie.
- Prélèvement d'un échantillon de mortier dans la zone témoin et dans la zone altérée et analyse au Microscope Electronique à Balayage (MEB).

5.4 RESULTATS DES INVESTIGATIONS

- L'analyse des documents d'archive indique que le liant du mortier est du ciment et que le remblai est essentiellement constitué de sable.
- Il n'a pas été constaté de cavité ou d'affouillement lors de la visite subaquatique du pied de l'ouvrage.
- Le test à l'indicateur coloré montre que la canalisation d'eau ne présente pas de fuite.
- Visuellement, les carottes extraites de la zone altérée montrent une altération importante de la maçonnerie de remplissage dans la zone soumise au marnage : mortier friable, pas de cohésion, nombreux vides, pas d'adhérence entre mortier et moellons. Dans la zone saine, la maçonnerie est de bonne qualité : mortier compact, bonne adhérence entre mortier et moellons. Les mesures de RQD confirment ces observations.
- Les essais Lugeon confirment la très forte perméabilité de la maçonnerie dans la zone soumise au marnage.
- L'analyse au MEB montre que l'échantillon prélevé en zone altérée ne présente pas de gel gonflant (sels de Candlot ou ettringite) mais qu'en revanche le mortier a été rendu très poreux par l'attaque simultanée des chlorures et des sulfates contenus dans l'eau de mer.

5.5 FORMULATION DU DIAGNOSTIC

- Le bombement en parement de même que le défaut d'alignement en plan du couronnement n'ont pas pour origine une poussée excessive du remblai soutenu.
- Les flaches et les affaissements de terre-plein n'ont pas pour origine des cavités ou des affouillements en pied de structure dans la partie constamment immergée.
- Les sondages montrent que la maçonnerie de remplissage est très altérée dans la zone de marnage (absence de cohésion, maçonnerie perméable).
- L'analyse du mortier montre qu'il n'y a pas de gonflement lié à la formation d'ettringite (sel de Candlot) mais simplement une attaque par les chlorures et les sulfates (mortier très poreux et quantité très faible de liant).

Les cycles successifs d'humidification et de séchage de la maçonnerie dans la zone de marnage ont favorisé l'attaque du mortier par les chlorures et les sulfates contenus dans l'eau de mer. Dans un premier temps, cette attaque a touché les joints de parement puis a progressivement atteint, dans un deuxième temps, la maçonnerie de remplissage. Exposée à l'eau de mer, la maçonnerie de remplissage s'est progressivement dégradée : lessivage du liant du mortier, décohésion. Ce phénomène a eu deux conséquences :

- augmentation de la perméabilité du mur favorisant les départs de fines contenues dans le remblai soutenu à l'origine des flaches et affaissements observés sur le terre-plein,

- décohésion de la maçonnerie de remplissage dans la zone de marnage : la maçonnerie de remplissage se comporte désormais comme un sol non cohérent exerçant une poussée sur la maçonnerie de parement. A cela s'ajoute la poussée hydrostatique de l'eau de mer pénétrant dans la structure à chaque marée. Ces poussées parasites (internes à la structure) sont à l'origine du bombement du parement dans la zone de marnage et des fissures verticales.

5.6 CONCLUSIONS - SUITES A DONNER

Les investigations réalisées ont permis de retenir l'hypothèse n°4 : les bombements du parement et le défaut d'alignement en plan du couronnement sont dus à une altération de la maçonnerie de remplissage (vieillissement en environnement marin).

Compte tenu des phénomènes mis en jeu, il n'existe pas de réparation pérenne possible. A terme, l'ouvrage devra être démoli et reconstruit partiellement ou totalement.

A court terme, certaines actions peuvent être envisagées pour ralentir les dégradations et stabiliser l'ouvrage à moyen terme :

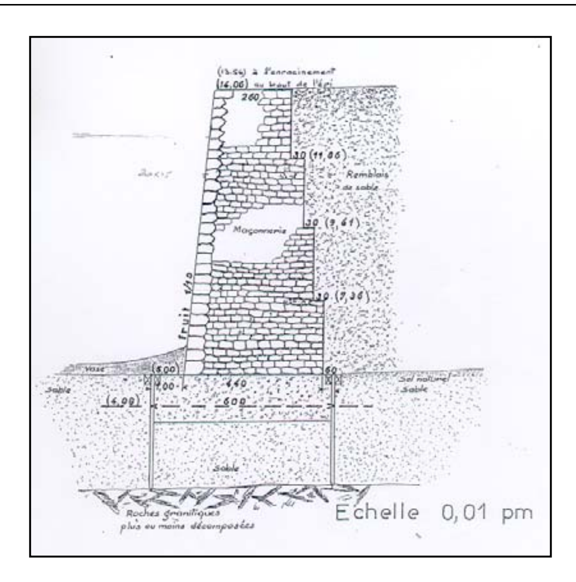
Actions	Objectifs
Rejointoiement de l'ensemble de la zone de parement déjointoyé	- Rendre le parement imperméable - Confiner la maçonnerie de remplissage
Injection de coulis de ciment dans la maçonnerie de remplissage au niveau de la zone de marnage	- Rendre monolithique la structure en lui redonnant de la cohésion - Faire cesser l'entraînement des fines
Surveillance géométrique	- S'assurer que le bombement du parement et le défaut d'alignement en plan du couronnement n'évoluent pas pendant et après la réparation

centre
d'Études
techniques
maritimes
et fluviales

Pathologies des ouvrages portuaires : méthodes d'investigation

Fiches Ouvrages

FICHE OUVRAGE : MUR POIDS EN MACONNERIE



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Ouvrages construits entre le 17ième siècle et le début du 20ième siècle. Ces murs peuvent atteindre une quinzaine de mètres de hauteur. La maçonnerie de revêtement ou de parement est le plus souvent en pierre de taille alors que le corps du mur en arrière du parement est en général en maçonnerie de moellons ordinaires non appareillés ou en « maçonnerie de béton » (béton cyclopéen). Le parement côté mer présente généralement un fruit. Le parement côté massif soutenu peut être constitué de plusieurs redans.

- Types de fondations

Plusieurs types de fondations peuvent être rencontrés selon l'époque de construction et les caractéristiques mécaniques du sol de fondation (liste non exhaustive) :

- fondation sur pieux en bois enserrés dans un massif de béton,
- fondation sur platelage en bois,
- semelle en béton.

- Fonctionnement global

Le mur poids en maçonnerie a pour fonction le soutènement des terres. L'effort de poussée exercé par le massif de terre soutenu est entièrement repris par le poids propre de l'ouvrage. On dit qu'il s'agit d'un mur gravitaire, c'est-à-dire que sa stabilité résulte de sa propre masse. Il est considéré auto-stable.

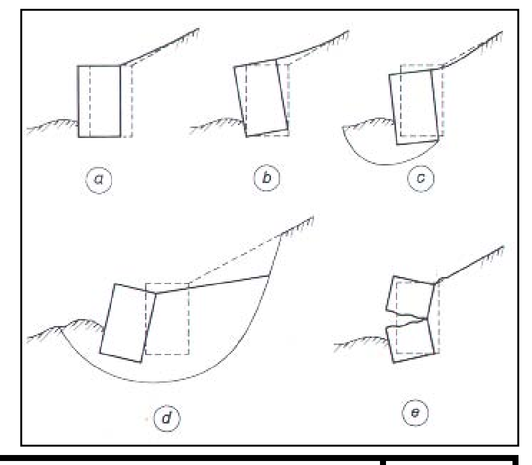
- Zone d'influence

La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrinsèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage

Les variantes concernent exclusivement la géométrie transversale (fruits, redans). Certains ouvrages ont pu être confortés selon différentes techniques (tirants, micro-pieux). L'appareillage de la maçonnerie peut varier d'un ouvrage à l'autre : assise régulière ou irrégulière, moellons ordinaires ou pierre de taille. L'attention est attirée sur le fait qu'au cours de leur vie les ouvrages ont pu être modifiés (superposition de plusieurs structures par exemple) ce qui peut rendre l'expertise plus délicate.
Remarque : certains murs poids en béton sont parés d'un appareillage en maçonnerie, ce qui peut porter à confusion.

3) Modes de dégradation ou de ruine



- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Glissement de l'ouvrage sur sa base (a)
- Renversement de l'ouvrage (b)
- Poinçonnement du sol de fondation (c)
- Grand glissement englobant l'ouvrage (d)
- Tassements différentiels

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Rupture de l'appareillage de maçonnerie (e)
- Altération des pierres de maçonnerie
- Altération du mortier

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Disjointoiement	Altération du mortier due à l'action mécanique de la mer	A
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
Gonflement du parement	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
Fissures et / ou fractures verticales ou inclinées dans le parement (avec ou sans rejet)	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	D
	Affouillements	E
Fissures et / ou fractures horizontales dans le parement (avec ou sans rejet)	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
Désorganisation de la maçonnerie, cavités ou lacunes dans le parement	Action mécanique de la mer (altération des pierres de maçonneries, etc.)	A
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	B
	Actions accidentelles (chocs, amarrages, etc.)	F
Fissuration du terre-plein parallèle au couronnement, affaissement, flaches dans le terre-plein	Renversement du mur	G
	Affouillement	E
	Fuite de matériaux par le parement (voir disjointoiement, cavités)	H
	Grand glissement	K
dégarnissage du système de fondation	Affouillement	E
	Dragage excessif	E
Renversement	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	C
	Poinçonnement du sol de fondation	J
	Actions accidentelles (chocs, amarrages, etc.)	F
Glissement de l'ouvrage sur sa base	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	C

POUR LE DIAGNOSTIC

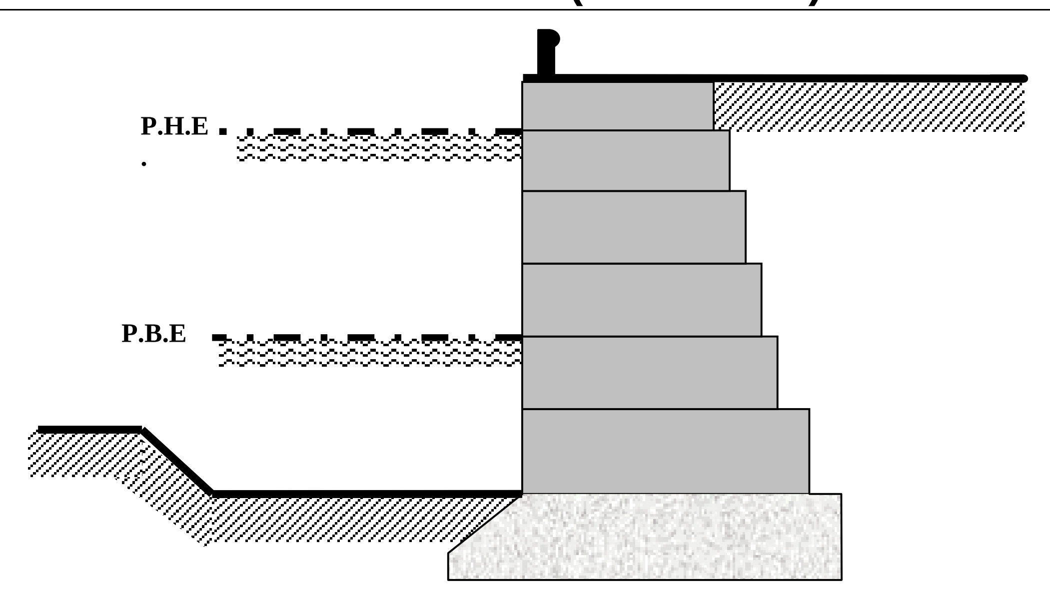
Niveau de pertinence:
Selon le nombre de symboles

			Causes possibles									
			A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
			Altération du mortier due à l'action mécanique de la mer	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Affouillements	Actions accidentelles (chocs, etc.)	Renversement du mur	Fuite de matériaux par le parement	Poinçonnement du sol de fondation	Grand glissement
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●	●	●	●	●●	●●	●	●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●	●	●	●●	●●	●	●●●	●	●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques		●						●		
		Endoscopie		●						●		
		Bathymétrie					●●					●
	Contrôles destructifs	Essais de compression sur carottes	●	●●								
		Analyse physico-chimique du mortier		●●●								
		RQD		●●						●●		
		Piézomètre		●	●●●				●●●	●	●	●●
		Pressiomètre			●	●●			●●		●●	●
		Pénétromètre			●	●					●	●
		Essais Lugeon		●●						●		
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol			●●●	●●			●●		●	●●●
	Etudes	Dossier d'ouvrage		●	●●	●	●●	●●	●●		●●	●●
		Re-calcul			●●	●	●	●	●●		●●	●●

POUR LE SUIVI

	Désordres					
Instrumentation Suivi	Fissures et / ou fractures verticales, horizontales ou inclinées	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Renversement du mur et/ou glissement sur sa base Grand glissement	Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Gonflement de maçonnerie	Disjointoiement, désorganisation de maçonnerie, cavités
Distancemétrie			●●		●	
Inclinométrie			●●●		●●	
Capteur de déplacement, fissurométrie	●●●	●●				
Nivellement x, y, z		●●●	●	●●		
Piézométrie	●	●	●●			
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)		●●●				
Profils laser, profils au fil à plomb,…			●●		●●●	
Bathymétrie				●●●		
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)	●●	●		●●●	●	●●●
Suivi photographique	●		●	●●		●●●

FICHE OUVRAGE : MUR POIDS (OU BLOCS) EN BETON



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Ouvrage massif en béton coulé en place ou en blocs préfabriqués.
Le parement côté mer peut présenter un fruit. Le parement côté massif soutenu est généralement constitué de plusieurs redans.

- Types de fondations

Plusieurs types de fondations peuvent être rencontrés selon l'époque de construction et les caractéristiques mécaniques du sol de fondation (liste non exhaustive) :

- fondation sur pieux en bois enserrés dans un massif de béton,
- fondation sur platelage en bois,
- semelle en béton.

Attention, beaucoup d'ouvrages sont reconstruits sur des fondations d'anciens ouvrages : les fondations sont parfois plus anciennes que l'ouvrage lui-même.

- Fonctionnement global

Le mur poids en béton a pour fonction le soutènement des terres. L'effort de poussée exercé par le massif de terre soutenu est entièrement repris par le poids propre de l'ouvrage. On dit qu'il s'agit d'un mur gravitaire, c'est-à-dire que sa stabilité résulte de sa propre masse. Il est considéré comme auto-stable.

- Zone d'influence

La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrasèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage

Les variantes concernent exclusivement la géométrie transversale (fruits, redans). Certains ouvrages ont pu être confortés selon différentes techniques (tirants, micro-pieux). L'attention est attirée sur le fait qu'au cours de leur vie les ouvrages ont pu être modifiés (superposition de plusieurs structures par exemple) ce qui peut rendre l'expertise plus délicate.
Remarque : certains murs poids en béton sont parés d'un appareillage en maçonnerie, ce qui peut porter à confusion.

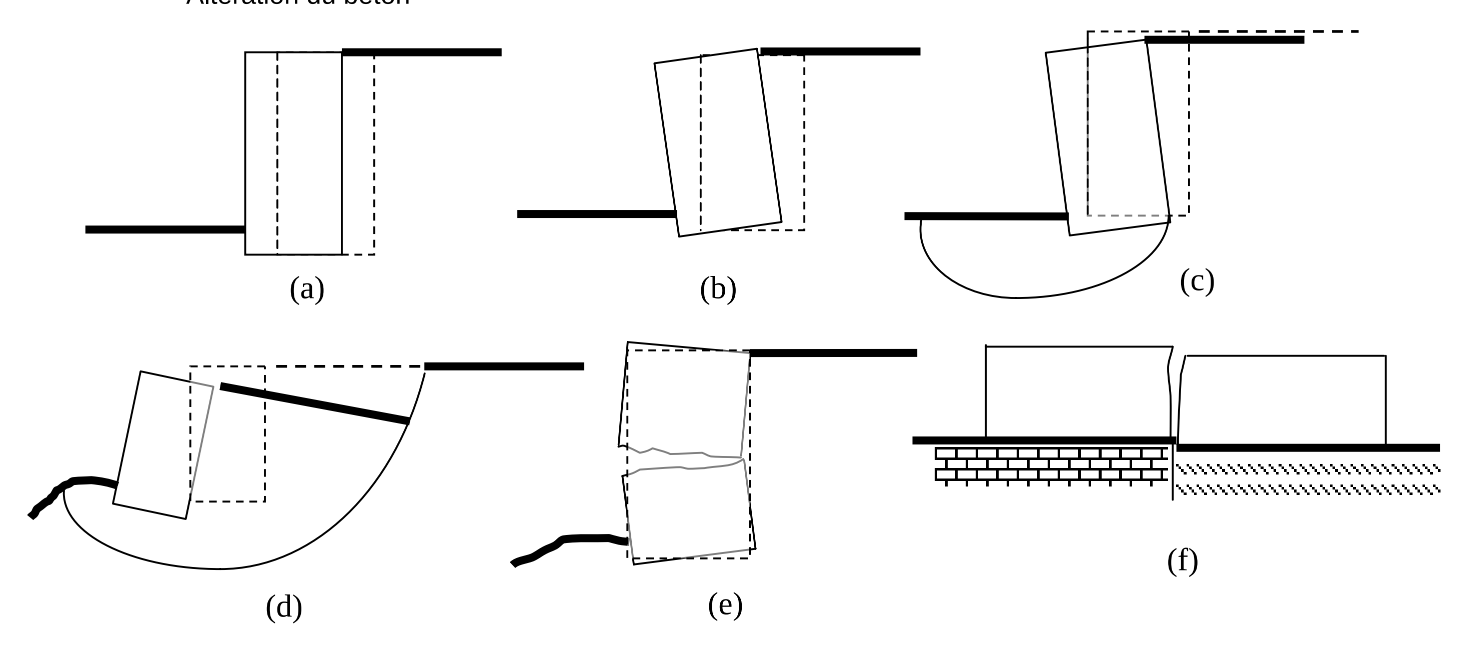
3) Modes de dégradation ou de ruine

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Glissement de l'ouvrage sur sa base (a)
- Renversement de l'ouvrage (b)
- Poinçonnement du sol de fondation (c)
- Grand glissement englobant l'ouvrage (d)
- Tassement différentiel (f)

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Rupture du béton ou des liaisons des blocs (e)
- Altération du béton



Désordres observés	Causes possibles	Famille
Altération du béton	Altération du béton due à l'action mécanique de la mer	A
	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer (corrosion des armatures, attaque chimique)	B
	Réaction de gonflement interne de béton	L
	Actions accidentelles (chocs, amarrages,….)	F
	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuses, etc.)	M
Fissures et / ou fractures verticales ou inclinées dans le parement	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	D
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Retrait gêné du béton	K
Fissures et / ou fractures horizontales dans le parement en dehors des joints des blocs	Affouillements	E
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
Fissures et / ou fractures horizontales dans le parement au niveau des joints des blocs	Affouillements	E
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
Fissuration du terre-plein parallèle au couronnement, affaissement, flaches dans le terre-plein	Renversement du mur	G
	Affouillements, dragage excessif	E
	Fuite de matériaux (renards)	M
	Grand glissement	N
Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Affouillements, dragage excessif	E
Renversement	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Poinçonnement du sol de fondation	J
	Actions accidentelles (chocs, amarrages, etc.)	F
Glissement de l'ouvrage sur sa base	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	C

POUR LE DIAGNOSTIC

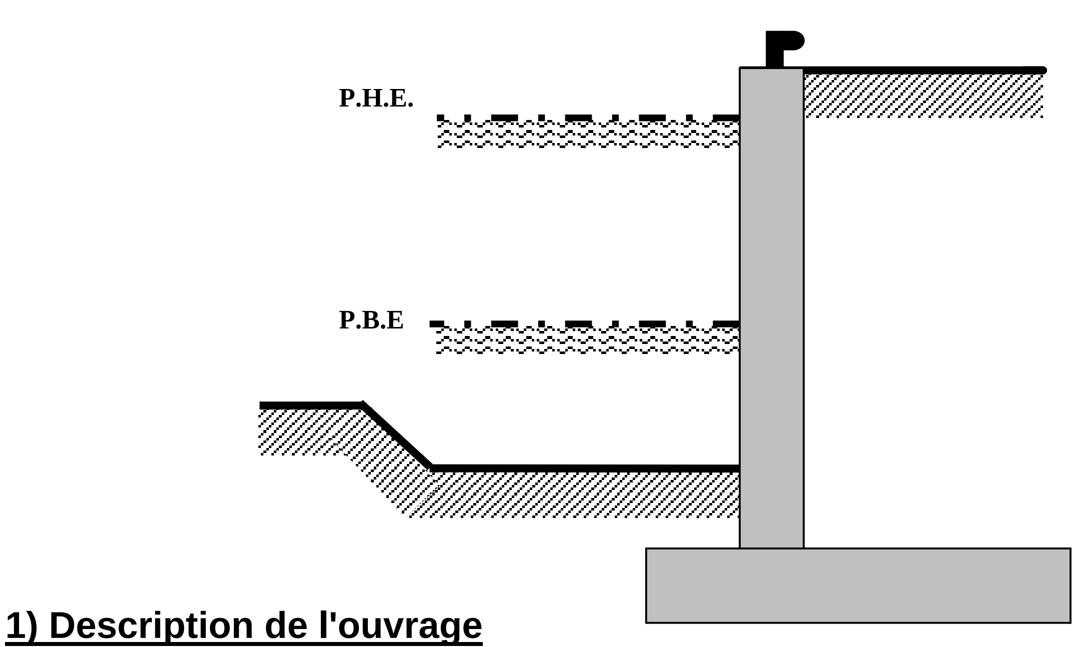
Niveau de pertinence: Selon le nombre de symboles

Type d'investigation			Causes possibles											
			A	B	C	D	E	F	G	J	K	L	M	N
			Altération du béton due à l'action mécanique de la mer	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de l'environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Affouillements	Actions accidentelles (chocs, etc.)	Renversement du mur	Poinçonnement du sol de fondation	Retrait gêné	Réaction de gonflement interne	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuses, …)	Grand glissement
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●	●	●	●	●●	●●	●	●	●●	●●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●	●	●	●●	●●	●	●	●	●	●●	●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques											●	
		Bathymétrie					●●							●
		Auscultation sonique											●●	
	Contrôles destructifs	Essai de compression sur carotte	●	●●								●	●●	
		RQD		●										
		Piézomètre		●	●●●				●●●	●				●●
		Pressiomètre			●	●●			●●	●●				●
		Pénétromètre			●	●				●				●
		Analyse physico-chimique du béton		●●●								●●●		
		Mesure des indicateurs de durabilité		●●								●●	●	
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol			●●●	●●			●●	●				●●●
	Etudes	Dossier d'ouvrage		●	●●	●	●●	●●	●●	●●	●●●		●	●●
		Re-calcul			●●	●	●	●	●●	●●				●●

POUR LE SUIVI

Instrumentation Suivi	Désordres				
	Fissures et / ou fractures verticales, horizontales ou inclinées	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Renversement du mur et/ou glissement sur sa base Grand glissement	Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Gonflement interne du béton
Distancemétrie			●●		●
Inclinométrie			●●●		●●
Capteur de déplacement, fissurométrie	●●●	●●			
Levé topo en x, y, z		●●●	●	●●	
Piézométrie	●	●	●●		
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)		●●●			
Profils laser, profils au fil à plomb,…			●●		●●●
Bathymétrie				●●●	
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)	●●	●●	●●	●●●	●
Suivi photographique	●	●	●	●●	
Indice de fissuration					●●●

FICHE OUVRAGE : VOILE EN BETON ARME SUR SEMELLE



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Ouvrage coulé en place ou préfabriqué constitué d'une semelle filante et d'un voile.
Le parement côté mer peut présenter un léger fruit.

- Types de fondations

La semelle constitue la fondation de l'ouvrage qui peut reposer sur un matériau d'apport, un gros béton ou le sol en place.
Attention, beaucoup d'ouvrages sont reconstruits sur des fondations d'anciens ouvrages. Les fondations sont parfois plus anciennes que l'ouvrage lui-même (pieux bois, fascines, ancienne maçonnerie, etc.).

- Fonctionnement global

Le voile en béton a pour fonction le soutènement des terres. L'effort de poussée exercé par le massif de terre soutenu est entièrement repris par le poids propre de l'ouvrage et le poids du remblai se trouvant sur la semelle. Le voile en béton armé est dimensionné pour reprendre les efforts de flexion induits par la poussée des terres.

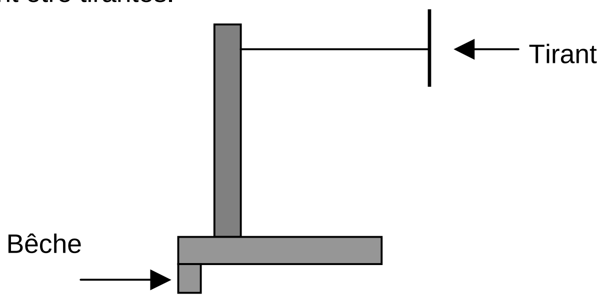
- Zone d'influence

La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrinsèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage

Certains ouvrages peuvent comporter une bêche sous la semelle pour mobiliser la butée des terres, assurer un rôle de parafouille, ou raidir l'ouvrage dans sa longueur (longrine).

Les voiles de grande hauteur peuvent être tirantés.



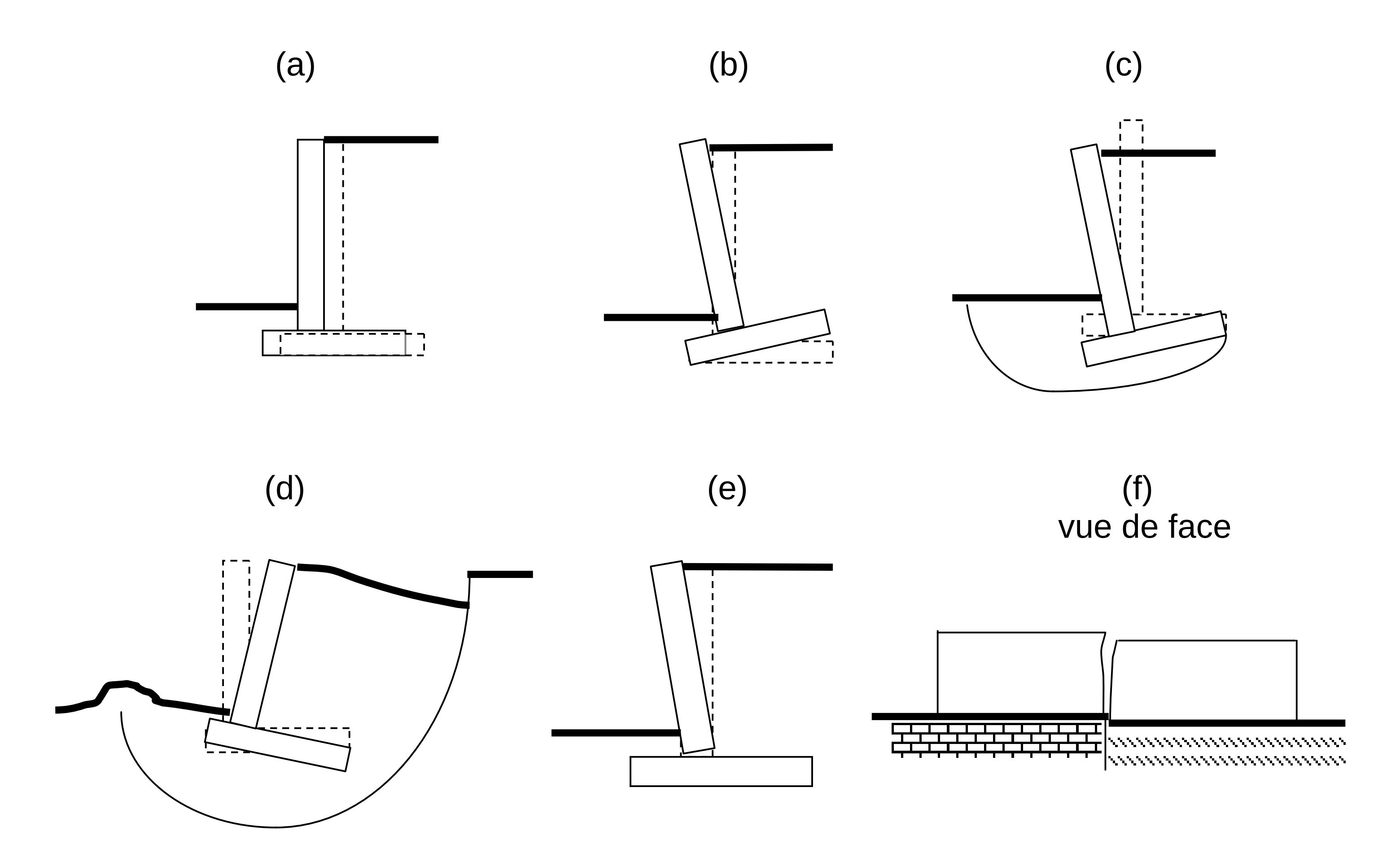
3) Modes de dégradation ou de ruine

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Glissement de l'ouvrage sur sa base (a)
- Renversement de l'ouvrage (b)
- Poinçonnement du sol de fondation (c)
- Grand glissement englobant l'ouvrage (d)
- Tassement différentiel (f)

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Rupture des armatures entre le voile et la semelle (e)
- Altération du béton armé



Désordres observés	Causes possibles	Famille
Altération du béton	Altération du béton due à l'action mécanique de la mer	A
	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de l'environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	B
	Réaction de gonflement interne de béton	L
	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuse …)	M
	Actions accidentelles (chocs, etc.)	F
Fissures et / ou fractures verticales ou inclinées dans le parement	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	D
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Retrait gêné du béton	K
Fissures et / ou fractures horizontales dans le parement	Affouillements	E
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
Fissuration du terre-plein parallèle au couronnement, affaissement, flaches dans le terre-plein	Renversement du mur	G
	Affouillements	E
	Fuite de matériaux (renards)	M
	Grand glissement	N
Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Affouillement	E
	Dragages excessifs	E
Renversement	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Poinçonnement du sol de fondation	J
	Actions accidentelles (chocs, etc.)	F
Déversement du voile (rupture des armatures entre le voile et la semelle)	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
Glissement de l'ouvrage sur sa base	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	C

POUR LE DIAGNOSTIC

Niveau de pertinence:
Selon le nombre de symboles

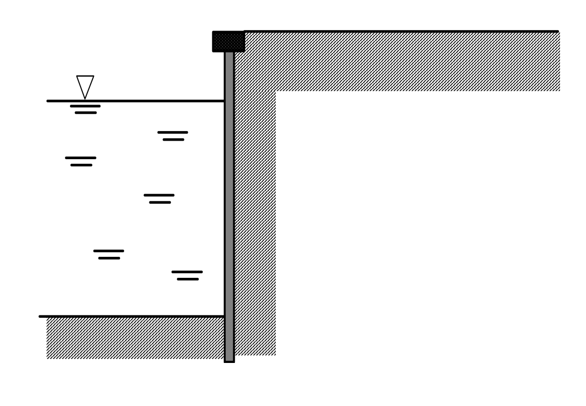
			Causes possibles											
			A	B	C	D	E	F	G	J	K	L	M	N
			Altération du béton due à l'action mécanique de la mer	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de l'environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Affouillements	Actions accidentelles (chocs, amarrages, etc.)	Renversement du mur	Poinçonnement du sol de fondation	Retrait gêné	Réaction de gonflement interne	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuse ...)	Grand glissement
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	● ●	●	●	●	●●	●●	●	●	●●	●●	●
		Inspection « subaquatique »	●	● ●	●	●	●●	●●	●	●	●	●	●●	●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques											●	
		Bathymétrie					●●							●
		Mesure d'enrobage		● ● ●									●●	
		Potentiel d'armatures		● ●										
		Vitesse de corrosion		●●										
		Auscultation sonique											●●	
	Contrôles destructifs	Essai de compression sur carotte											●●	
		Profils de pénétration des chlorures		● ● ●									●●	
		Profondeur de carbonatation		●									●	
		Mesure des indicateurs de durabilité		● ●								●●	●	
		Piézomètre			● ● ●				●●●	●				●●
		Pressiomètre			●	● ●			●●	●●				●
		Pénétromètre			●	●				●				●
		Analyse physico-chimique du béton		● ●								●●●		
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol			● ● ●	● ●			●●	●				●●●
	Etudes	Dossier d'ouvrage		●	● ●	●	●●	● ●	●●	●●	●●●	●●	●	●●
		Re-calcul			● ●	●	●	●	●●	●●				●●

POUR LE SUIVI

	Désordres					
Instrumentation Suivi	Altération du béton (corrosion des armatures)	Fissures et / ou fractures verticales, horizontales ou inclinées	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Renversement du mur et/ou glissement du mur sur sa base Grand Glissement	Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Gonflement interne du béton
Distancemétrie				● ●		●
Inclinométrie				● ● ●		● ●
Capteur de déplacement, fissurométrie		● ● ●	● ●			
Levé topo en x, y, z			● ● ●	●	● ●	
Piézométrie		●	●	● ●		
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)			● ● ●			
Profils laser, profils au fil à plomb,…				● ●		● ● ●
Bathymétrie					● ● ●	
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)		● ●	●	●	● ● ●	●
Suivi photographique		●	●	●	● ●	
Potentiel d'armatures	● ●					
Vitesse de corrosion	● ●					
Profils de pénétration des chlorures	● ● ●					
Indice de fissuration						● ● ●

FICHE OUVRAGE : RIDEAU DE PALPLANCHES





1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Ouvrage constitué de palplanches métalliques emboîtées les unes dans les autres et battues dans le sol de fondation, pour former un écran vertical, le plus souvent rectiligne, servant de soutènement à un massif de sol.

- Types de fondations

Fondation par fichage dans le sol.

- Fonctionnement global

Le fonctionnement des rideaux de palplanches est celui d'une structure chargée par la poussée des terres et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une part, par le sol en fiche (partie enterrée du rideau en pied) et, d'autre part, s'il y lieu, par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran.

- Zone d'influence

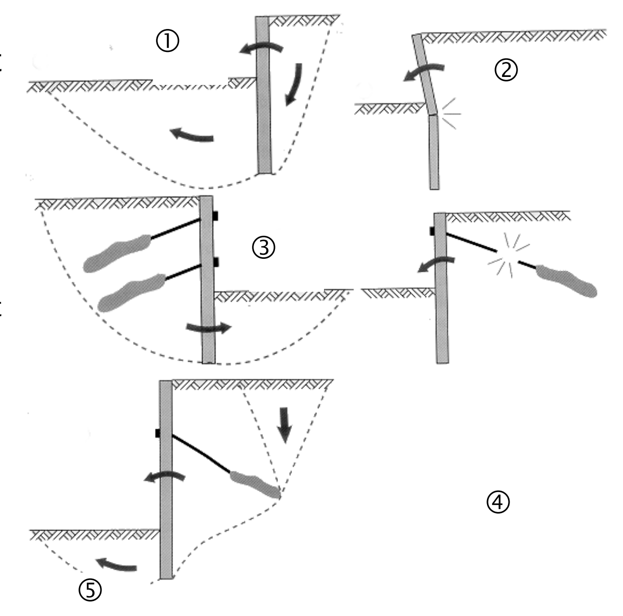
La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrasèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois à cinq fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage

Dans le cas où les forces de butée sont insuffisantes, un système d'ancrage en tête par tirants est utilisé (tirants remblayés, tirants forés ou battus, tirants actifs, etc.) ou par butons.

3) Modes de dégradation ou de ruine

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :



- Insuffisance de la fiche et/ou insuffisance de butée ①
- Insuffisance du dimensionnement des palplanches ②
- Grand glissement ③
- Rupture de tirant ou de buton ④
- Défaillance du massif d'ancrage ou du scellement et du terrain associé ⑤
- Boulance (renard liquide)
- Erosion régressive (renard solide)
- Soulèvement du massif en pied

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Corrosion des palplanches ②
- Corrosion des têtes de tirant.

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Fissuration du terrain parallèle au rideau	Grand glissement	A
	Poussée du massif	B
	Rupture de tirants	E
Tassement du terrain en tête du rideau	Consolidation du terrain (tassements)	C
	Entraînement de fines	D
	Rupture d'une canalisation	F
Effondrement local du terrain soutenu	Entraînement de fines, fuite de matériaux	D
	Rupture d'une canalisation	F
Inclinaison anormale du rideau vers l'aval	Insuffisance de fiche	H
	Défaut de mise en oeuvre	I
	Rupture de tirants	E
	Poussée du massif	B
	Rupture d'une canalisation	F
	Affouillement, dragage excessif	O
Inclinaison anormale du rideau vers l'amont	Glissement de l'ensemble de l'ouvrage	A
	Défaut de mise en oeuvre	I
	Sollicitations excessives	B
Déplacement vertical	Capacité portante du sol insuffisante	G
	Sollicitations excessives	F
Flèche excessive (rideaux ancrés)	Sollicitations excessives	B
	Défaut de drainage en arrière du rideau	B
	Rupture de tirants	E
	Affouillement, dragage excessif	O
Déformation en plan	Sollicitations excessives	F
	Rupture de tirants	E
	Insuffisance de fiche	H
	Rupture d'une canalisation	F
Déchirure ou dégrafage de palplanches	Actions accidentelles	F
	Sollicitations excessives	B
	Défaut de mise en oeuvre	I
Perforation de palplanches	Défaillance de la protection anti-corrosion	L
	Bio-corrosion, pollution de l'eau	N

POUR LE DIAGNOSTIC

Niveau de pertinence:
Selon le nombre de symboles

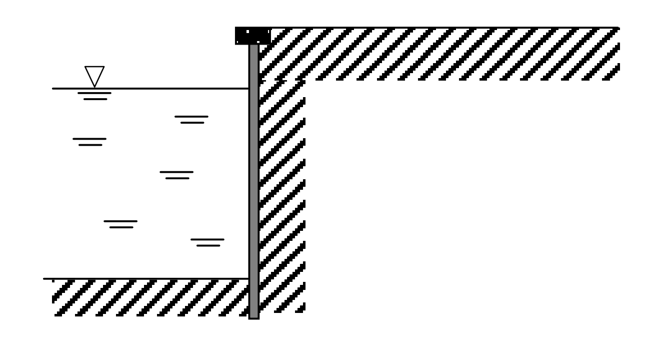
			Causes possibles														
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
			Grand glissement	Poussée du massif	Tassement du remblai	Fuite de matériaux	Rupture de tirants	Surcharge accidentelle	Défaut de capacité du sol	Insuffisance de fiche	Défaut de mise en oeuvre	Rupture de canalisation	Actions accidentelles	Défaillance de la protection anti-corrosion	Défaillance de la protection cathodique	Bio-corrosion, pollution de l'eau	Affouillements
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●	●	●●	●●	●●	●	●	●●	●●	●●	●●	●●	●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●		●●	●	●			●●		●	●	●	●	●●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques			●	●	●					●●					
		Bathymétrie	●	●						●							●●
		Mesure d'épaisseur de peinture												●●●	●●●	●●●	
		Mesure d'épaisseur résiduelle de métal												●●●	●●●	●●●	
		Mesure de potentiel de métal												●●	●●	●●	
		Analyse chimique de l'eau												●	●	●●●	
		Analyse « biocorrosion »														●●●	
	Contrôles destructifs	Piézomètre	●●	●●●	●	●●											
		Pressiomètre	●	●	●				●●	●							
		Pénétromètre	●	●	●	●			●								
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol	●●●	●●●	●●●	●●			●								
	Etudes	Dossier d'ouvrage	●●	●●	●	●●●	●●	●●	●	●●	●	●	●●	●●	●●		●●
		Re-calcul	●●	●●	●●	●	●●	●●		●				●	●	●	●

POUR LE SUIVI

	Désordres			
Instrumentation Suivi	Altération du métal	Grand glissement	Déformation du soutènement	Tassement du remblai
Distancemétrie		●	●●	
Inclinométrie		●●●	●●●	
Capteur de déplacement, fissurométrie		●	●	
Nivellement x, y, z		●	●	●●●
Piézométrie		●	●●●	●●
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)				●●●
Profils laser, profils au fil à plomb,…			●●	
Bathymétrie		●●	●	
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)	●	●	●	
Suivi photographique		●	●	
Indice de fissuration				
Mesure d'épaisseur de penture	●●			
Mesure d'épaisseur résiduelle de métal	●●			
Suivi des anodes	●●			

FICHE D'OUVRAGE : PAROI MOULEE





1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Soutènement obtenu par bétonnage à l'intérieur d'une fouille étroite et profonde servant de coffrage, dont les parois sont maintenues par une boue argileuse (boue bentonitique). La technique de la paroi moulée permet de construire des ouvrages de dimensions supérieures à celles des ouvrages en palplanche, tout en assurant des faibles déformations.

- Types de fondations

La paroi remplit le rôle de fondation profonde porteuse.

- Fonctionnement global

Les pressions exercées par le massif de terre à retenir sont équilibrées par les forces de butée mobilisées dans la partie en fiche et par un système d'ancrage en tête (tirants, butons, etc.). La paroi en béton armé est dimensionnée pour reprendre les efforts de flexion dus à la poussée des terres.

- Zone d'influence

La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrasèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois à cinq fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage

Les variantes principales concernent la disposition des dispositifs d'ancrage (tirants actifs forés dans le sol ou massif d'ancrage relié par des tirants passifs ou des poutres).

3) Modes de dégradation ou de ruine

Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Glissement par rupture de la butée de pied
- Renversement par rupture des tirants d'ancrage ou défaillance du massif d'ancrage ou du scellement dans le terrain
- Grand glissement
- Tassement différentiel par insuffisance de capacité portante

Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Défaut d'étanchéité entre panneaux
- Altération du béton armé
- Corrosion des armatures du béton
- Corrosion des tirants
- Boulance (renard liquide)
- Erosion régressive (renard solide)

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Fissuration du terrain parallèle au rideau	Grand glissement	A
	Poussée du massif	B
	Rupture de tirants	E
Tassement du terrain en tête du rideau	Consolidation du terrain (tassements)	C
	Entraînement de fines	D
	Rupture d'une canalisation	F
Effondrement local du terrain soutenu	Entraînement de fines, fuite de matériaux	D
	Rupture d'une canalisation	F
Inclinaison anormale du rideau vers l'aval	Insuffisance de fiche	H
	Défaut de mise en oeuvre	I
	Rupture de tirants	E
	Poussée du massif	B
	Rupture de canalisation	J
	Affouillement, dragage excessif	N
Inclinaison anormale du rideau vers l'amont	Glissement de l'ensemble de l'ouvrage	A
	Défaut de mise en oeuvre	I
	Sollicitations excessives	B
Déplacement vertical	Capacité portante du sol insuffisante	G
	Sollicitations excessives	F
Flèche excessive (rideaux ancrés)	Poussée du remblai	B
	Défaut de drainage en arrière du rideau	B
	Rupture de tirants	E
	Affouillement, dragage excessif	N
Déformation en plan	Poussée du remblai	E
	Rupture de tirants	E
	Insuffisance de fiche	H
	Rupture de canalisation	J
Percolation d'eau ou entraînement de fines	Défaut d'étanchéité des joints	K
	Altération du béton due à un défaut d'exécution	I
	Rupture de canalisation	J
Altération du béton	Altération du béton due à un défaut d'exécution	I
	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer (corrosion des armatures, attaque chimique)	L
	Réaction de gonflement interne	M

POUR LE DIAGNOSTIC

Niveau de pertinence :
Selon le nombre de symboles

			Causes possibles													
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
			Grand glissement	Poussée du massif	Tassement du remblai	Fuite de matériaux	Rupture de tirants	Surcharge accidentelle	Défaut de capacité du sol	Insuffisance de fiche	Défaut d'exécution du béton	Rupture de canalisation	Défaut d'étanchéité des joints	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau	Réaction de gonflement interne	Affouillement
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●	●	●●	●●	●●	●	●	●●	●●	●●	●●	●●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●		●●	●	●			●●		●	●	●	●●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques			●	●	●				●	●●				
		Bathymétrie	●	●						●						●●
		Mesure d'enrobage									●●●					
		Potentiel d'armatures									●●					
		Vitesse de corrosion									●●					
		Auscultation sonique									●●					
	Contrôles destructifs	Essai de compression sur carotte												●●		
		Profils de pénétration des chlorures									●●●			●●●		
		Profondeur de carbonatation									●			●		
		Mesure des indicateurs de durabilité									●			●●	●●	
		Piézomètre	●●	●●●	●	●●										
		Pressiomètre	●	●	●				●●	●						
		Pénétromètre	●	●	●	●			●							
		Analyse physico-chimique du béton									●●					
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol	●●●	●●●	●	●●			●							
	Etudes	Dossier d'ouvrage	●●	●●	●	●●●	●●	●●	●	●●	●	●	●●	●●	●●	●●
		Re-calcul	●●	●●	●●	●	●●	●●		●				●	●	●

POUR LE SUIVI

	Désordres					
Instrumentation Suivi	Altération du béton	Réaction de gonflement interne	Grand glissement	Déformation du soutènement	Tassement du remblai	Défaut de portance de la paroi moulée
Distancemétrie		●	●	●●		●
Inclinométrie			●●●	●●●		
Capteur de déplacement, fissurométrie		●	●	●		
Nivellement x, y, z			●	●	●●●	●
Piézométrie			●	●●●	●●	
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)					●●●	
Profils laser, profils au fil à plomb,…				●●		
Bathymétrie			●●	●		
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)		●	●	●		
Suivi photographique			●	●		
Potentiel d'armatures	●●					
Vitesse de corrosion	●●					
Profils de pénétration des chlorures	●●●					
Indice de fissuration		●				

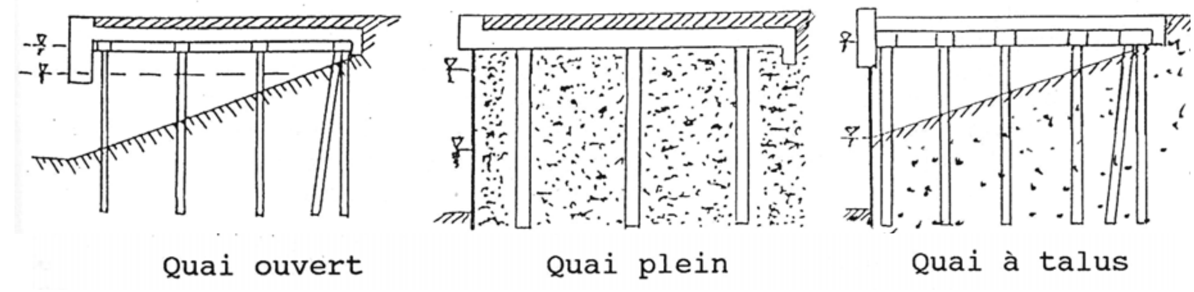
FICHE OUVRAGE : QUAI SUR PIEUX



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Plate-forme en béton armé reposant sur des pieux. On distingue deux familles de quai sur pieux :
- Les quais sans soutènement avant, appelés quais ouverts. Le talus sous le quai doit être autostable, ce qui impose la largeur de la plate-forme. Ce type de quai est plutôt adapté aux faibles profondeur d'eau.
- Les quais avec soutènement avant. Le soutènement a le plus souvent également un rôle de portance verticale. Il est généralement constitué d'un rideau de palplanches (avec éventuellement des palpieux, ou des pieux tubes). On distingue les quais pleins et les quais à talus.

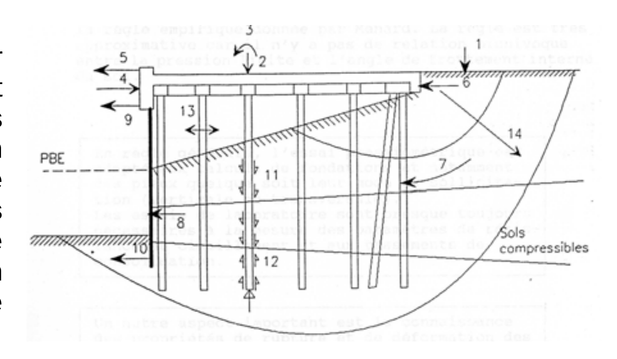


- Types de fondations

Les pieux font à la fois partie de la structure et des fondations. Le plus souvent les pieux sont métalliques. Ils sont en général bétonnés et ferraillés en tête.

- Fonctionnement global

Les efforts verticaux sont transmis au sol de fondation par les pieux. Les efforts horizontaux sont repris partiellement par les pieux et par la plate-forme. Dans certaines structures, les efforts horizontaux peuvent être repris en partie par un système de tirants/contre-rideaux/plaque d'ancrage. Le soutènement avant reprend la poussée des terres soutenues. La largeur de la plate-forme est imposée par les conditions de stabilité du talus et de son soutènement. Le remblai situé sous l'ouvrage doit être considéré comme partie intégrante de l'ouvrage



- Zone d'influence

La zone d'influence est directement dépendante du type de quai sur pieux. Selon que l'on est en présence d'un quai ouvert, d'un quai plein ou d'un quai à talus avec ou sans tirants/contre-rideau/ancrage, la prise en considération des éléments de mécanique des sols (angle de frottement, fiche, etc.) conduira à des zones d'influence plus ou moins étendues. La zone d'influence doit donc être déterminée au cas par cas.

2) Variantes de l'ouvrage

Les variantes concernent particulièrement la géométrie du talus sous le quai. Dans le cas des quais ouverts, une variante consiste à réaliser un soutènement à l'arrière du quai (peu recommandé). Pour les quais pleins, une variante consiste à incliner la paroi de soutènement ce qui réduit considérablement la poussée du remblai. Dans le cas des quai pleins, le soutènement est généralement stabilisé par des tirants d'ancrage.
Des variantes sont possibles selon le type de plate-forme : plate-forme haute (la circulation se fait directement sur l'ouvrage) ou plate-forme basse (l'ouvrage supporte un remblai qui protège le béton et permet une meilleure diffusion des charges).

3) Modes de dégradation ou de ruine

Le quai sur pieux est une association de plusieurs types de structures : la plate-forme en béton armé, les pieux métalliques, le talus protégé par un enrochement, le rideau de palplanches avant, l'éventuel rideau de palplanches arrière et les éventuels tirants d'ancrage. Les modes de dégradation ou de ruine sont donc plus ou moins complexes.
Dans la présente fiche, ne sera donc traité que le cas du quai sur pieux ouvert sans tirants d'ancrage.

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Grand glissement
- Glissement du talus sous l'ouvrage
- Défaut de portance des pieux
- Défaillance du rideau de soutènement (voir les fiches ouvrages « rideau de palplanches et paroi moulée »)

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Altération du béton armé
- Corrosion des pieux métalliques
- Affouillement à l'arrière de la plate-forme
- Défaut d'enrochement

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Affaissement, fissuration du terre-plein à l'arrière de la plate-forme	Grand glissement	A
	Déformation du soutènement, poussée du massif retenu	B
	Tassement du remblai	C
	Fuite de matériaux	O
Inclinaison anormale de pieux	Défaut d'exécution	D
	Défaut de portance des pieux	E
	Surcharge accidentelle	F
Défaut de profil en long de la poutre de couronnement, affaissement de la plate-forme	Défaut d'exécution	D
	Défaut de portance des pieux	E
	Surcharge accidentelle	F
Bourrelet en pied d'ouvrage	Déformation du rideau	B
	Grand glissement	A
	Envasement	G
	Sous-dimensionnement de l'enrochement	H
Altérations du béton	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuse …)	I
	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de l'environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	J
	Réaction de gonflement interne	K
Corrosion des pieux métalliques	Défaillance de la protection anti-corrosion	L
	Défaillance de la protection cathodique	M
	Bio-corrosion, pollution de l'eau	N

POUR LE DIAGNOSTIC

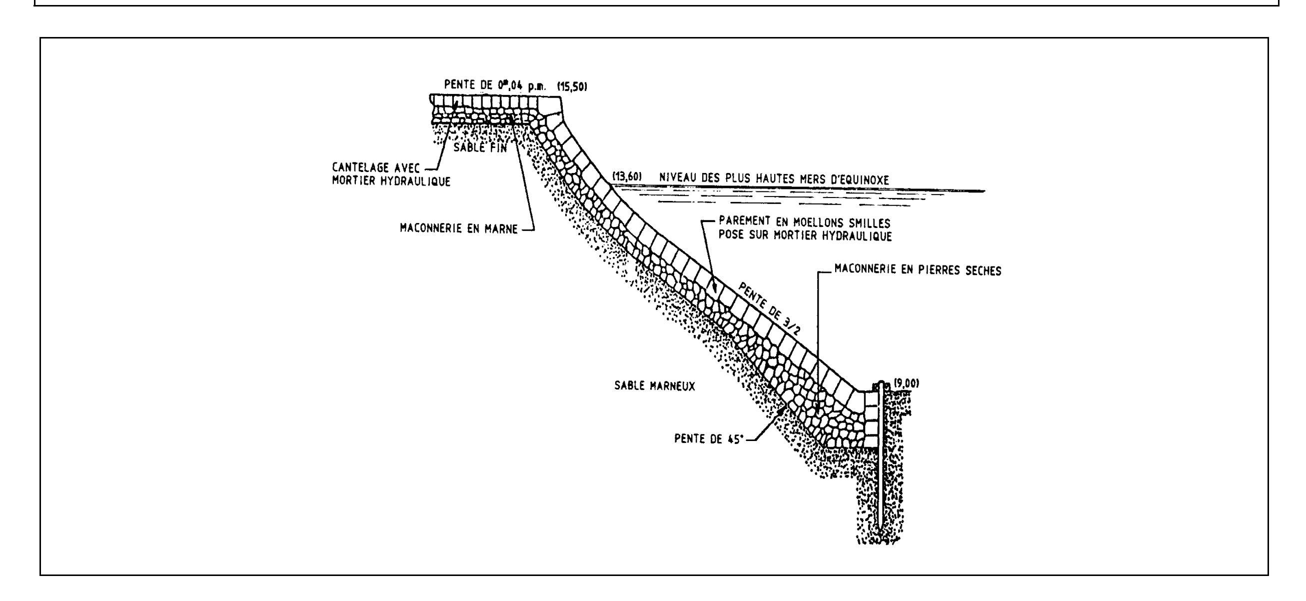
Niveau de pertinence : Selon le nombre de symboles

Type d'investigation		Causes possibles	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
			Grand glissement	Poussée du massif	Tassement du remblai	Défaut d'exécution (pieux, remblai, etc.)	Défaut de portance des pieux	Surcharge accidentelle	Envasement	Sous-dimensionnement de l'enrochement	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuse …)	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de l'environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	Réaction de gonflement interne	Défaillance de la protection anti-corrosion	Défaillance de la protection cathodique	Bio-corrosion, pollution de l'eau
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●●	●●●	●●	●●	●●		●●	●●	●●	●●	●●	●●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●		●	●●	●	●●	●●	●●	●●	●	●	●	●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques			●						●					
		Bathymétrie	●	●					●●●							
		Mesure d'enrobage									●●	●●●				
		Potentiel d'armatures										●●				
		Vitesse de corrosion										●				
		Auscultation sonique									●●					
		Mesure d'épaisseur de peinture												●●●	●●●	●●●
		Mesure d'épaisseur de métal												●●●	●●●	●●●
		Mesure de potentiel de métal												●●	●●	●●
	Contrôles destructifs	Essai de compression sur carotte									●●	●●	●			
		Profils de pénétration des chlorures									●●	●●●				
		Profondeur de carbonatation									●	●				
		Mesure des indicateurs de durabilité									●	●●	●●			
		Analyse chimique de l'eau														●●●
		Analyse « biocorrosion »														●●●
		Piézomètre	●●	●●●	●●											
		Pressiomètre	●	●●	●		●●									
		Pénétromètre	●	●	●	●	●									
		Analyse physico-chimique du béton										●●	●● ●			
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol	●●●	●●●	●●●	●	●									
	Etudes	Dossier d'ouvrage	●●	●●	●	●●●	●●	●●	●	●●	●	●	●●	●●	●●	
		Re-calcul	●●	●●	●	●	●●	●●		●				●	●	●

POUR LE SUIVI

Instrumentation Suivi	Désordres : Altération du béton (corrosion des armatures)	Altération du métal (corrosion des pieux)	Grand glissement	Déformation du soutènement	Tassement du remblai	Défaut de portance des pieux	Gonflement interne du béton
Distancemétrie			●	●●		●	●
Inclinométrie			●●●	●●●		●	
Capteur de déplacement, fissurométrie			●	●			●
Nivellement x, y, z			●	●	●●●		
Piézométrie				●●	●●		
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)					●●●		
Profils laser, profils au fil à plomb,…			●●	●●			
Bathymétrie			●●	●●			
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)		●	●	●			●
Suivi photographique			●	●			
Potentiel d'armatures	●●						
Vitesse de corrosion	●●						
Profils de pénétration des chlorures	●●●						
Indice de fissuration							●●●
Mesure d'épaisseur de penture		●●					
Mesure d'épaisseur de métal		●●				●●	
Suivi des anodes		●●					

FICHE OUVRAGE : Perré



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Ouvrages construits entre le 17ème siècle et le début du 20ème siècle. Ils ont généralement pour fonction la protection et le maintien du trait de côte.
Le parement en maçonnerie présente une pente douce et a pour objectif de fixer et de protéger les matériaux constitutifs du corps de la structure.
Ce sont des ouvrages de revêtement réalisés en règle générale en pierres sèches, en maçonnerie jointoyée ou en béton. Les éléments réalisés en maçonnerie peuvent être jointoyés à l'aide de mortier de chaux hydraulique, de mortier de ciment, de mortier bâtard ou encore à l'aide de produits bitumineux.
Généralement, les perrés maçonnés comportent un parement en maçonnerie de pierres sèches, ou un parement maçonné de pierres jointoyées par un mortier (ciment ou chaux hydraulique), reposant sur une préparation d'argile ou éventuellement sur de simples fagots serrés de branchages.

- Types de fondations

Ces ouvrages peuvent reposer en pied sur des fondations de type longrines dont la côte est inférieure à celle du sol naturel. La fondation peut éventuellement être protégée par un rideau de palplanches ou un tunage en bois pouvant servir de parafouille ou de butée de pied.

- Fonctionnement global

Les perrés ont pour fonction la protection superficielle des talus : maintenir en place et protéger les matériaux constitutifs d'une structure. Ils sont auto-stables.

- Zone d'influence

La zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance environ égale à 1 fois la hauteur de l'ouvrage.

2) Variantes de l'ouvrage

Les possibilités de variantes concernent la nature du revêtement de protection :
- Revêtement en maçonnerie : appareillage d'assise régulière ou irrégulière, en moellons ordinaires ou pierre équarries jointoyés ou non
- Revêtement en béton armé

Les variantes concernent également la nature de la fondation en pied d'ouvrage : présence de parafouille, etc.

3) Modes de dégradation ou de ruine

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Grand glissement
- Glissement du talus
- Poinçonnement/flexion du revêtement
- Tassement

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage

- Altération de la maçonnerie
- Altérations du béton
- Affouillement en pied ou en tête d'ouvrage

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Affaissement, fissuration du terre-plein arrière	Grand glissement	A
	Glissement du talus par rupture ou insuffisance de la butée de pied	B
Affaissement dans le revêtement	Cavités, vide sous le revêtement, fuite de matériaux, tassement	C
Fissuration horizontale dans le tiers central du parement	Cavités, vide sous le revêtement, fuite de matériaux, tassement	C
	Insuffisance de résistance à la flexion du parement	D
Fissuration verticale ou biaise du parement	Cavités, vide sous le revêtement, tassement	C
Bourrelet en pied d'ouvrage	Grand glissement	A
	Glissement du talus par rupture de la butée de pied	B
Altérations du béton	Altération du béton due à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuses, …)	E
	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de son environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	F
	Réaction de gonflement interne	G
Altérations de la maçonnerie	Altération du mortier due à l'action mécanique de la mer	H
	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	I
Affouillement, dégarnissage du système de fondation en pied	Affouillement, action mécanique de la houle	J
	Dragage excessif	J

POUR LE DIAGNOSTIC

Niveau de pertinence:
Selon le nombre de symboles

Type d'investigation			Causes possibles									
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
			Grand glissement	Glissement du talus par rupture ou insuffisance de la butée de pied	Cavités, vide sous le revêtement, fuite de matériaux, tassement	Insuffisance de résistance à la flexion du parement	Altération du béton due à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuses, …)	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de son environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	Réaction de gonflement interne	Altération du mortier due à l'action mécanique de la mer	Altération du mortier due à l'action chimique de l'eau de mer	Affouillement
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●●	●	●●	●●	●●	●●	●	●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●●		●	●●	●●	●	●	●	●●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques			●●●	●	●				●	
		Bathymétrie	●	●●								●●
		Mesure d'enrobage				●	●●	●●●				
		Potentiel d'armatures						●●				
		Vitesse de corrosion						●				
		Auscultation sonique					●●					
	Contrôles destructifs	Essai de compression sur carotte				●●	●●				●	
		Profils de pénétration des chlorures					●●	●●●				
		Profondeur de carbonatation					●	●				
		Mesure des indicateurs de durabilité					●	●●				
		Piézomètre	●●	●	●							
		Pressiomètre	●	●	●							
		Pénétromètre	●	●	●●							
		Analyse physico-chimique du mortier									●●●	
		Analyse physico-chimique du béton						●●	●●●			
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol	●●●	●●	●●●							
	Etudes	Dossier d'ouvrage	●●	●●	●	●●	●	●	●●		●	●●
		Re-calcul	●●	●●	●	●●						●

POUR LE SUIVI

Instrumentation Suivi	Désordres					
	Altérations du béton	Altérations de la maçonnerie	Grand glissement	Glissement du talus par rupture de la butée de pied	Tassements, fuite de matériaux	Gonflement interne du béton
Distancemétrie			●		●	●
Inclinométrie			●●●	●●●		
Capteur de déplacement, fissurométrie		●				
Nivellement x, y, z		●	●	●	●	
Piézométrie			●		●	
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)					●	
Bathymétrie			●●	●●		
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)	●	●	●	●	●	●
Suivi photographique						
Potentiel d'armatures	●●					
Vitesse de corrosion	●●					
Profils de pénétration des chlorures	●●●					
Indice de fissuration						●●●

FICHE OUVRAGE : Gabion de palplanches



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Les gabions cellulaires sont constitués d'une enceinte de palplanches métalliques plates remplie d'un remblai frottant. Leurs formes sont variées et peuvent être juxtaposées. Ils sont utilisés dans des sites portuaires ou fluviaux comme soutènements ou comme batardeaux. Ces structures doivent alors être en mesure de résister aux actions extérieures de l'eau, du sol et les charges portuaires. Un ouvrage constitué de gabions est appelé « gabionnade ».

- Types de fondations

On distingue

- Les gabions fondés sur le rocher (ancrés de quelques dizaines de centimètres dans le substratum)
- Les gabions flottants où les palplanches sont fichées dans le sol jusqu'à une profondeur déterminée par les conditions de stabilité d'ensemble

- Fonctionnement global

On distingue

- ♦ les appontements, où le quai est constitué par une dalle reposant sur des gabions circulaires espacés constituant des piles autostables. Les navires peuvent accoster et s'amarrer des deux côtés de l'appontement ;

- ♦ la gabionnade adossée à un remblai vis-à-vis duquel elle assure la fonction de soutènement des terres ;

- les gabions isolés peuvent assurer une fonction d'accostage, d'amarrage ou d'évitage des navires, à la manière d'un duc d'Albe.

- Zone d'influence

La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrasèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage

Les variantes concernent principalement la géométrie des enceintes. On peut distinguer les différents types d'enceintes suivantes :

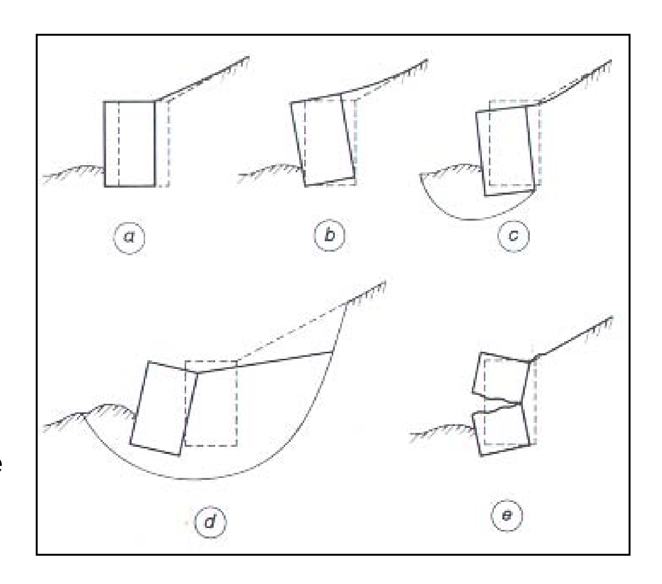
- gabions circulaires,
- gabions en feuilles de trèfle,
- gabionnades constituées de cellules circulaires reliées par des cellules de raccordement en arcs circulaires,
- gabionnades constituées de cellules semi-circulaires cloisonnées,

Remarque : les gabions circulaires sont auto-stables

3) Modes de dégradation ou de ruine

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Glissement de l'ouvrage sur sa base (a)
- Renversement de l'ouvrage (b)
- Poinçonnement du sol de fondation (c)
- Grand glissement englobant l'ouvrage (d)
- Tassement du sol de fondation
- Boulance (renard liquide)
- Erosion régressive (renard solide)
- Soulèvement du massif en pied



- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Dégrafage des palplanches
- Corrosion des palplanches
- Colmatage du système éventuel de drainage
- Tassement du remblai interne
- Rupture du massif interne

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Fissuration du terrain parallèle au gabion	Grand glissement	A
	Poussée du massif	B
	Glissement de l'ouvrage sur sa base	B
Tassement du terrain dans le gabion	Consolidation du terrain (tassements)	C
	Entraînement de fines	D
Tassement ou effondrement local du terrain soutenu	Entraînement de fines, fuite de matériaux	D
	Consolidation du terrain	C
	Rupture d'une canalisation	J
Inclinaison anormale du gabion	Insuffisance de fiche	H
	Défaut de mise en oeuvre	I
	Grand glissement	A
	Poussée du massif et/ou défaut de drainage	B
	Affouillement, dragage excessif	O
Déplacement vertical	Capacité portante du sol insuffisante	G
	Sollicitations excessives	F
Déformation en plan	Sollicitations excessives	F
	Insuffisance de fiche	H
	Affouillement, dragage excessif	O
Déchirure ou dégrafage de palplanches	Actions accidentelles	K
	Sollicitations excessives	B
	Défaut de mise en oeuvre	I
Perforation palplanches	Défaillance de la protection anti-corrosion	L
	Défaillance de la protection cathodique	M
	Bio-corrosion, pollution de l'eau	N

POUR LE DIAGNOSTIC

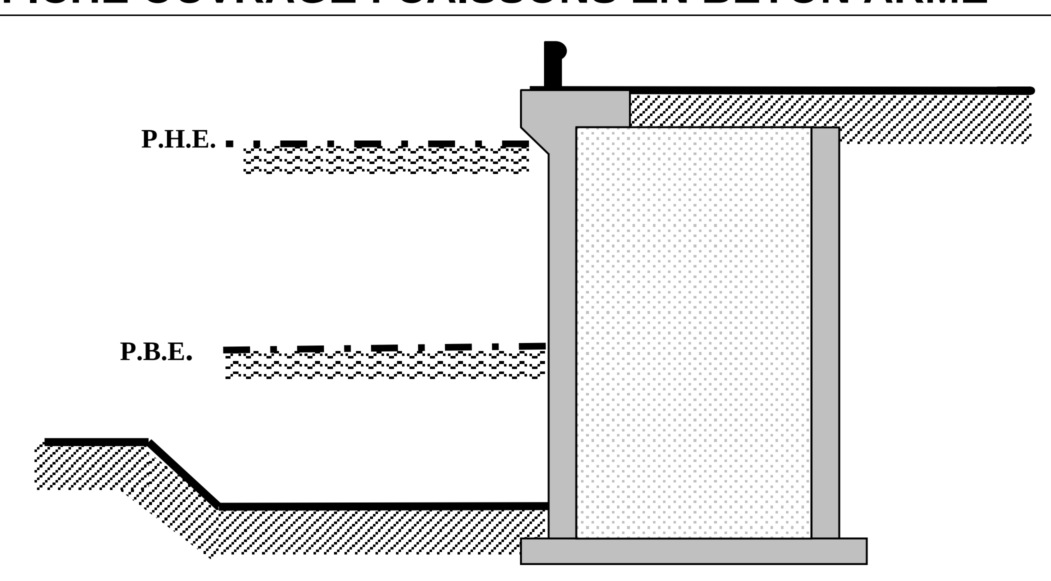
Niveau de pertinence:
Selon le nombre de symboles

Type d'investigation			Causes possibles													
			A Grand glissement	B Poussée du massif	C Tassement du remblai	D Fuite de matériaux	F Surcharge accidentelle	G Défaut de capacité du sol	H Insuffisance de fiche	I Défaut de mise en oeuvre	J Rupture de canalisation	K Actions accidentelles	L Défaillance de la protection anti-corrosion	M Défaillance de la protection cathodique	N Bio-corrosion, pollution de l'eau	O Affouillements
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●	●	●●	●●	●	●	●●	●●	●●	●●	●●	●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●		●●	●			●●		●	●	●	●	●●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques			●	●					●●					
		Bathymétrie	●	●					●							●●
		Mesure d'épaisseur de peinture											●●●	●●●	●●●	
		Mesure d'épaisseur de métal											●●●	●●●	●●●	
		Mesure de potentiel de métal											●●	●●	●●	
		Analyse chimique de l'eau											●	●	●●●	
		Analyse « biocorrosion »													●●●	
	Contrôles destructifs	Piézomètre	●●	●●●	●	●●										
		Pressiomètre	●	●	●			●●	●							
		Pénétromètre	●	●	●	●		●								
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol	●●●	●●●	●●●	●●		●								
	Etudes	Dossier d'ouvrage	●●	●●	●	●●●	●●	●	●●	●	●	●●	●●	●●		●●
		Re-calcul	●●	●●	●●	●	●●		●				●	●	●	●

POUR LE SUIVI

Instrumentation Suivi	Désordres Altération du métal	Grand glissement	Déformation du soutènement	Tassement du remblai	Renversement du gabion et/ou glissement sur sa base
Distancemétrie		●	●●		●●
Inclinométrie		●●●	●●●		●●
Capteur de déplacement, fissurométrie		●	●		●
Nivellement x, y, z		●	●	●●●	●
Piézométrie		●	●●●	●●	●
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)				●●●	
Profils laser, profils au fil à plomb,…			●●		
Bathymétrie		●●	●		
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)	●	●	●		●
Suivi photographique		●	●		●
Mesure d'épaisseur de penture	●●				
Mesure d'épaisseur de métal	●●				
Suivi des anodes	●●				

FICHE OUVRAGE : CAISSONS EN BETON ARME



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Ouvrages massifs constitués par la juxtaposition de caissons en béton armé amenés le plus souvent par flottaison.
Les caissons sont remplis de matériau afin de constituer un ouvrage poids.

- Types de fondations

Les caissons sont généralement posés sur un lit de ballast.

- Fonctionnement global

Les caissons en béton armé ont pour fonction le soutènement des terres. L'effort de poussée exercé par le massif de terre soutenu est entièrement repris par le poids propre de l'ouvrage. On dit qu'il s'agit d'un ouvrage gravitaire : la stabilité est assurée par le poids propre du caisson et du matériau de remplissage. Il est considéré auto-stable.

- Zone d'influence

La zone d'influence peut être définie grâce aux caractéristiques intrinsèques du sol soutenu et du sol en butée. D'une manière générale, la zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre.

2) Variantes de l'ouvrage

Les caissons peuvent être cubiques, cylindriques ou autres.

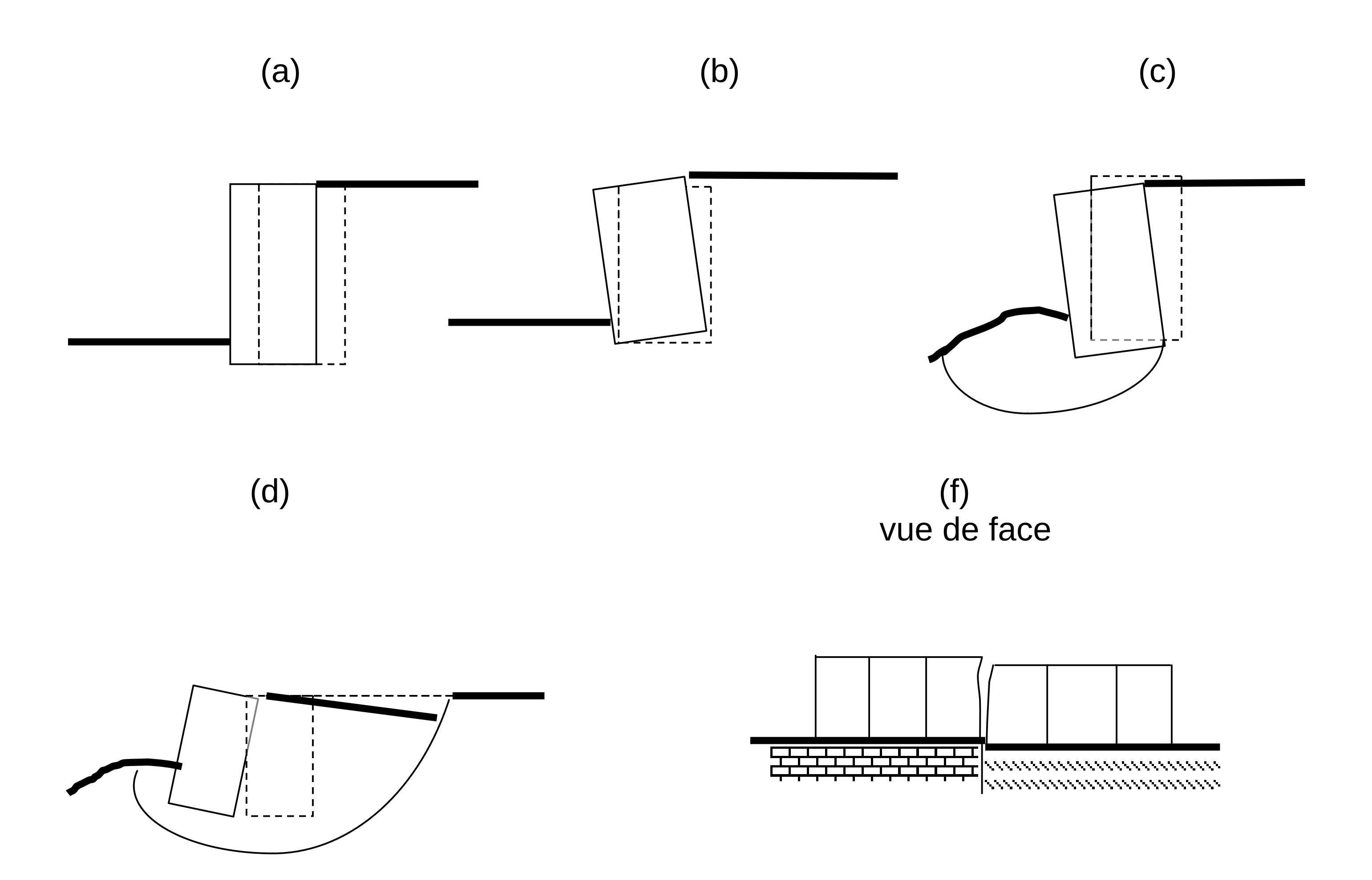
3) Modes de dégradation ou de ruine

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique :

- Glissement de l'ouvrage sur sa base (a)
- Renversement de l'ouvrage (b)
- Poinçonnement du sol de fondation (c)
- Grand glissement englobant l'ouvrage (d)
- Tassement différentiel (f)

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- Rupture du béton ou des liaisons des blocs
- Altération du béton armé


(a)
(b)
(c)
(d)
(f)
vue de face

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Altération du béton	Altération du béton due à l'action mécanique de la mer	A
	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de son environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	B
	Réaction de gonflement interne de béton	L
	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuses,…)	M
	Actions accidentelles (chocs, amarrages,….)	F
Fissures et / ou fractures verticales ou inclinées dans le parement d'un caisson	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	D
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Retrait gêné du béton	K
Fissures et / ou fractures horizontales dans le parement d'un caisson	Affouillements	E
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
Fissures et / ou fractures horizontales dans le parement au niveau des joints des blocs	Affouillements	E
	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
Fissuration du terre-plein parallèle au couronnement, affaissement, flaches dans le terre-plein	Renversement du mur	G
	Affouillements	E
	Grand glissement	N
	Fuite de matériaux	I
Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Affouillements, dragages excessifs	E
Renversement	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge	C
	Poinçonnement du sol de fondation	J
	Actions accidentelles (chocs, amarrages,….)	F
Glissement de l'ouvrage sur sa base	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	C

POUR LE DIAGNOSTIC

Niveau de pertinence :
Selon le nombre de symboles

Type d'investigation			Causes possibles												
			A	B	C	D	E	F	G	I	J	K	L	M	N
			Altération du béton due à l'action mécanique de la mer	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de son environnement (corrosion des armatures, attaque chimique)	Poussée excessive du massif soutenu : - Poussée hydrostatique - Surcharge - Sous-dimensionnement	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Affouillements	Actions accidentelles (chocs, amarrages,…)	Renversement du mur	Fuite de matériaux	Poinçonnement du sol de fondation	Retrait gêné	Réaction de gonflement interne	Altérations du béton dues à un défaut d'exécution (nid de cailloux, cavités, zones poreuses,…)	Grand glissement
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●●	●	●	●	●●	●●	●●	●	●	●●	●●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●●	●	●	●●	●●	●	●	●	●	●	●●	●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques								●				●	
		Bathymétrie					●●			●●					●
		Mesure d'enrobage		●●●										●●	
		Potentiel d'armatures		●●											
		Vitesse de corrosion		●											
		Auscultation sonique												●●	
	Contrôles destructifs	Essai de compression sur carotte	●	●●										●●	
		Profils de pénétration des chlorures		●●●										●●	
		Profondeur de carbonatation		●										●	
		Mesure des indicateurs de durabilité		●●									●●	●	
		Analyse physico-chimique du béton		●●									●●●		
		Piézomètre			●●●				●●●		●				●●
		Pressiomètre			●	●●			●●		●●				●
		Pénétromètre			●	●					●				●
		Prélèvement et essais de caractérisation du sol			●●●	●●			●●		●				●●●
	Etudes	Dossier d'ouvrage		●	●●	●	●●	●●	●●		●●	●●●	●●	●	●●
		Re-calcul			●●	●	●	●	●●		●●				●●

POUR LE SUIVI

Instrumentation Suivi	Désordres					
	Altération du béton (corrosion des armatures)	Fissures et / ou fractures verticales, horizontales ou inclinées	Tassements différentiels (peuvent être d'origine)	Renversement du mur et/ou glissement sur sa base Grand glissement	Affouillement, dégarnissage du système de fondation	Gonflement interne du béton
Distancemétrie				●●		●
Inclinométrie				●●●		●●
Capteur de déplacement, fissurométrie		●●●	●●			
Levé topo en x, y, z			●●●	●	●●	
Piézométrie		●	●	●●		
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)			●●●			
Profils laser, profils au fil à plomb,…				●●		●●●
Bathymétrie					●●●	
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)		●●	●	●	●●●	●
Suivi photographique		●		●	●●	
Potentiel d'armatures	●●					
Vitesse de corrosion	●●					
Profils de pénétration des chlorures	●●●					
Indice de fissuration						●●●

FICHE OUVRAGE : DIGUE EN ENROCHEMENT



1) Description de l'ouvrage

- Définition de la structure

Les digues à talus sont constituées d'un empilage d'enrochements naturels et/ou de blocs artificiels en béton, et pouvant être couronné par un mur plus ou moins haut.

- Types de fondations

Les digues à talus sont fondées superficiellement sur le terrain naturel.

- Fonctionnement global

Les digues à talus sont des ouvrages qui permettent de protéger un port ou une partie d'un port (plan d'eau, terre-plein) contre les actions de la houle (attaque directe, franchissements, submersion, érosion, etc.).

- Zone d'influence

La zone d'influence s'étend de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à 1 à 3 fois la hauteur de l'ouvrage.

2) Variantes de l'ouvrage

On distingue les digues à talus et les digues mixtes (cette fiche ne traite pas des digues verticales en maçonnerie ou béton). Les digues mixtes sont surmontées d'un parement de hauteur parfois importante (aussi appelé muraille)

3) Modes de dégradation ou de ruine

Les dégradations observées sur les digues en enrochements dues à l'action mécanique de la mer (franchissement de la digue, déplacement des enrochements) ne sont pas traitées ici.

- Mode de rupture lié au fonctionnement mécanique:

- Grand glissement
- Capacité portante du sol
- Instabilité hydraulique et stabilité des filtres
- Liquéfaction
- tassements – déformation

- Altération ou dégradation liée au type de matériaux constitutifs de l'ouvrage :

- altération des bétons
- altération des enrochements

Désordres observés	Causes possibles	Famille
Affaissement, fissuration de la digue	Grand glissement	A
	Glissement du talus par rupture ou insuffisance de la butée de pied	B
Affaissement dans la carapace, lacunes	Cavités, vide sous le revêtement, tassement des matériaux de la digue, fuite de matériaux	C
Tassement de la digue	Tassement des matériaux de la digue	C
	Tassement du sol support	D
Bourrelet en pied d'ouvrage	Grand glissement	A
	Glissement du talus par rupture de la butée de pied	B
Altérations du béton	Altération du béton due à un défaut d'exécution	E
	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de son environnement (attaque chimique)	F
	Réaction de gonflement interne	G
Altérations des enrochements	Altération des enrochements due à l'action mécanique de la mer	H
	Altération des enrochements due à l'action chimique de l'eau de mer	I
Affouillement, dégarnissage du système de fondation en pied	Affouillements, dragage excessif	J
Affouillement en tête	Fuite de matériaux	C

POUR LE DIAGNOSTIC

Niveau de pertinence: Selon le nombre de symboles

			Causes possibles									
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
			Grand glissement	Glissement de la digue par rupture ou insuffisance de la butée de pied	Cavités, vide sous le revêtement, tassement des matériaux de la digue	Tassement du sol support	Altération du béton due à un défaut d'exécution	Altération du béton due à l'action chimique de l'eau de mer ou de son environnement	Réaction de gonflement interne	Altération des enrochements due à l'action mécanique de la mer	Altération des enrochements due à l'action chimique de l'eau de mer	Affouillements
Type d'investigation	Inspection visuelle	Inspection « aérienne »	●	●●		●●	●●	●●	●●	●	●	●
		Inspection « subaquatique »	●	●●		●	●●	●●	●	●	●	●●
	Contrôles non destructifs	RADAR, techniques géophysiques			●●●		●				●	
		Endoscopie			●							
		Bathymétrie	●	●●								●●
		Auscultation sonique					●●					
	Contrôles destructifs	Essai de compression sur carotte					●●			●		
		Piézomètre	●●	●	●	●						
		Pressiomètre	●	●	●	●						
		Pénétromètre	●	●	●●	●						
		Analyse physico-chimique du béton						●●	●●●			
		Essais de caractérisation du sol ou des enrochements naturels	●●●	●●	●●	●●●				●	●●	
	Etudes	Dossier d'ouvrage	●●	●●	●	●●	●	●	●●		●	●●
		Re-calcul	●●	●●	●	●●						●

POUR LE SUIVI

	Désordres					
Instrumentation Suivi	Altérations du béton	Altérations de la maçonnerie	Grand glissement	Glissement par rupture de la butée de pied	Tassements	Gonflement interne du béton
Distancemétrie			●	●	●	●
Inclinométrie			●●●	●●●		
Capteur de déplacement, fissurométrie		●				
Nivellement x, y, z		●	●	●	●	
Piézométrie			●		●	
Capteur de tassement (tassomètre, distofor)			●		●●	
Bathymétrie			●●	●●		
Inspection visuelle (aérienne ou subaquatique)	●	●	●	●	●	●
Suivi photographique			●	●	●	
Potentiel d'armatures	●●					
Vitesse de corrosion	●●					
Profils de pénétration des chlorures	●●●					
Indice de fissuration						●●●

centre
d'Études
techniques
maritimes
et fluviales

Pathologies des ouvrages portuaires : méthodes d'investigation

Fiches Méthodes

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Mesure de la profondeur de carbonatation



1) Nom de la méthode

Mesure de la profondeur de carbonatation

2) Description: principe de la méthode

La présente fiche décrit la méthode pour évaluer la profondeur de béton carbonaté d'un parement béton.

3) Domaine d'application

Cette méthode s'inscrit dans le cadre d'un diagnostic de corrosion des armatures passives ou actives d'un béton armé ou précontraint.

4) Mode opératoire:

Généralités :

- La mesure de la profondeur de carbonatation est effectuée sur des carottes de béton prélevées sur ouvrage (voir fiche correspondante)
- Les carottes doivent vérifier les conditions suivantes :
  - La longueur des carottes (l) doit être supérieure à l'enrobage des armatures.
  - Le diamètre (∅) minimum est de 50 mm.
- Un schéma d'implantation doit être défini avant l'opération.

Conditions particulières :

Position et nombre de prélèvements :



- La mesure se fait à partir d'un prélèvement ponctuel (voir fiche correspondante)
- Le nombre de carottes sur lesquelles seront faites les mesures dépend de la surface auscultée, de son exposition
- La longueur des carottes doit au moins intégrer l'épaisseur d'enrobage des armatures

Technique de mesure :

- Mesure effectuée en laboratoire sur des cassures fraîches des carottes réalisées par fendage
- Immédiatement après le fendage, pulvérisation d'eau distillée ou déminéralisée sur les tranches de la carotte
- Après absorption de l'eau par le béton, pulvérisation de l'indicateur coloré (à base de phénolphtaléine)
- Profondeur de carbonatation* notée immédiatement sur une feuille d'essai
- Conservation des carottes après prélèvement et avant fendage dans des sacs plastiques étanches identifiés

*La mesure s'effectue en trois points sur le diamètre de la carotte avec une précision de 1/10ième de mm. Le résultat est la moyenne des trois mesures, si celles-ci ne sont pas dispersées de plus de 10%.

Matériels :

- Carotteuse (groupe électrogène si nécessaire)
- Dispositif d'approvisionnement en eau
- Dispositif de fixation (matériel de perçage, chevilles)
- Dispositif d'extraction des carottes
- Pachomètre éventuellement
- Dispositif de fendage (presse)
- Jauge de profondeur à 1/10 à pointe fine
- Réglet
- Solution à base de phénolphtaléine (dosée à 1% dans de l'alcool éthylique)
- Vaporisateur contenant l'eau distillée ou déminéralisée
- Eau distillée ou déminéralisée

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- Le phénomène de carbonatation est maximal dans une ambiance à 60% d'hygrométrie relative. En environnement maritime, l'hygrométrie relative est proche de 100% ; c'est la raison pour laquelle la carbonatation est généralement limitée.
- Les fissures dans le béton influence le phénomène de carbonatation. Elles doivent être indiquées sur le plan d'implantation des carottes utilisées pour la mesure
- Un revêtement de protection (peinture, enduit,….) du béton ralentit le phénomène de carbonatation. Les zones revêtues et leur état (pelade, décollement) doivent être identifiés et notés
- L'état du parement et plus particulièrement de l'enrobage des armatures (porosité, nid de cailloux, fissures) sont des paramètres influant sur le mécanisme de carbonatation.

6) Auscultations complémentaires:

Toute mesure de profondeur de carbonatation doit être couplée à une mesure d'épaisseur d'enrobage. La connaissance de la profondeur de carbonatation et l'épaisseur d'enrobage permet de conclure sur les risques de corrosions des armatures.

Les mesures profondeur de carbonatation s'effectuent dans le cadre d'un diagnostic de corrosion des armatures. En environnement maritime, ces mesures doivent nécessairement être couplée à des mesures de teneur en chlorures sur échantillons de béton (voir fiche correspondante)

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

Le compte-rendu de la mesure de profondeur de carbonatation doit comprendre :

- L'implantation des carottes dans la structures
- Les conditions de carottage et toutes informations relatives à son déroulement (température, hauteur de marée,…)
- Le n° d'échantillon et d'identification du prélèvement (partie d'ouvrage/position)
- L'environnement de la zone (voir NF P 18-011 et NF EN 206-1)
- Les conditions d'expositions (marnage, embruns, ruissellement d'eau, houle, agitation, …)
- Les 3 mesures individuelles de profondeur de carbonatation pour chaque tranche de carottes : P1, P2 et P3 et moyenne P
- Photographies et description sommaire de chaque carotte

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

La connaissance de la profondeur de carbonatation et l'épaisseur d'enrobage permet de conclure sur les risques de corrosions des armatures.

9) Prix

Le prix dépend :

Voir également prix carottage

- du nombre de carottes soumises à une mesure de profondeur de carbonatation
- de l'amortissement du matériel et des produits
- du déplacement du laboratoire au site
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire

10) Référence biblio, normatives

NF EN 12390-2: Essais pour béton durci – Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance

NF EN 12504-1: Essais pour béton dans les structures – Partie 1: Carottes – Prélèvement, examen et essais en compression

NF EN 206-1 : Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité

NF P 18-011 : Béton – Classification des environnements agressifs

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Probabilité de corrosion des armatures du béton armé



1) Nom de la méthode

Probabilité de corrosion des armatures du béton armé

2) Description: principe de la méthode

La présente fiche décrit la méthode pour évaluer l'état d'enrouillement des armatures du béton armé, à partir de l'essai de mesure de potentiel d'armature.

Les armatures de béton armé sont protégées naturellement contre la corrosion. Cependant, cette passivation peut disparaître lorsque l'enrobage du béton a subi des altérations, notamment d'origine chimique (carbonatation, chlorures). On propose ici une méthode permettant de connaître ponctuellement l'état d'enrouillement d'un acier par la mesure des paramètres électrochimiques de l'interface acier / pâte de ciment.

3) Domaine d'application

Cette méthode s'inscrit dans le cadre d'un diagnostic de corrosion des armatures passives du béton armé.

Les armatures des ouvrages en béton se trouvent en contact avec le liquide interstitiel contenu dans les pores du béton. Ce liquide peut être considéré comme un électrolyte fortement alcalin dont le pH se situe entre 12,5 et 13,5.

Le début d'une corrosion sur l'armature provoque un phénomène électrochimique et la zone en cours de corrosion se comporte comme une anode génératrice d'électrons et les zones passivées servent de cathode. Les variations de potentiels ainsi crées sur la longueur de l'armature reflètent alors l'avancement de la corrosion. L'estimation du degré de corrosion des armatures est ainsi basée sur la mesure de ces potentiels.

Les zones corrodées (anodiques) se signalent par un voltage négatif très élevé. Les variation du voltage sont en rapport direct avec les degrés de corrosion.

4) Mode opératoire:

Généralités :

Les mesures ne sont réalisables que sous certaines conditions :
- Continuité électrique des armatures
- Continuité électrolytique du système qui suppose un béton humide et une absence de revêtement électriquement étanche (isolant)

Conditions particulières :

- **Détection des armatures**

A l'aide d'un matériel du type « pachomètre » on localise les armatures de la structure en béton armé que l'on veut ausculter. On matérialise leur tracé à la surface du béton à l'aide d'un craie grasse jaune.

- **Préparation de la surface à examiner**

La surface à examiner doit être aussi propre que possible : surface exempte de toutes salissures, peinture ou enduit gênant la conductivité du béton.

- **Réalisation de la prise de contact sur les armatures**

Pour réaliser cette prise de contact, on peut soit détruire, soit carotter ou percer le béton pour arriver en contact de l'armature. Lorsque ce contact est réalisé, on peut faire un contrôle pour s'assurer que l'ensemble du système d'armature est bien connecté électriquement ensemble.

- **Humidification du support**

Le béton doit être rendu humide par aspersion d'eau avant la mesure.

- **Réalisation des mesures**

Le contact entre la contre électrode et le béton doit être parfait. A cette effet, l'éponge de la contre électrode doit être légèrement comprimée sur l'ensemble de sa surface. On procède alors aux mesures le long des armatures avec un pas adapté.

Matériels :
- Appareil de mesure de potentiel d'armature (électrodes de références (type Cu/CuSO4))
- Système de localisation des armatures
- Outils nécessaires au dégagement d'une ou plusieurs armatures (perceuse, carotteuse)
- Voltmètre haute impédance (10 Mohms minimum)
- Eponge, mètre, décamètre, craies,…
- Appareil photo

Remarque :

Selon la nature et la configuration de la structure à ausculter, il pourra être nécessaire d'utiliser des moyens d'accès adaptés et spécifiques :
- Elévateur
- Passerelle négative
- Bateau
- Nacelle élévatrice

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

La présente méthode s'applique sur des structures émergés ou en zone marnante. La norme ASTM C 876-91 propose 3 classes de probabilité de corrosion en fonction des potentiels mesurés :

Potentiel d'électrode	Probabilité de corrosion des armatures
Ev > -200 mv	Faible
-350 mV < Ev < -200 mV	Incertaine
Ev < -350 mV	Forte

En environnement maritime, la présence de chlorures dans le béton décale les plages présentées ci-dessus vers des potentiels plus négatifs. L'interprétation est donc plus délicate et c'est pourquoi les recommandations RILEM TC 154 préconisent d'analyser les gradients de potentiels plutôt que les valeurs absolues de potentiels.

En site constamment immergé, la mesure classique de potentiel d'électrode ne peut s'appliquer à cause du couplage électrolytique dû à l'environnement aqueux.. On emploie alors une technique brevetée LPC, qui consiste à produire, autour de l'électrode de mesure, un vide d'eau (cellule de mesure). L'oxygénation de la zone de béton où est faite la mesure n'étant pas instantanée, un appareillage spécifique permet de plaquer la ou les cellule(s) contre le parement et d'effectuer la mesure en continu pendant le temps nécessaire.

6) Auscultations complémentaires:

La méthode de mesures de potentiel d'électrode est non-destructive (semi-destructive) ; il est donc conseillé de l'associer à des techniques destructives qui permettent d'étalonner les plages de probabilité de corrosion :

- Mesure de profondeur de carbonatation (voir fiche correspondante)
- Essais de teneur en chlorures (voir fiche correspondante)
- Mesures d'épaisseur d'enrobage (voir fiche correspondante)
- Dégagement d'armature pour inspection visuelle

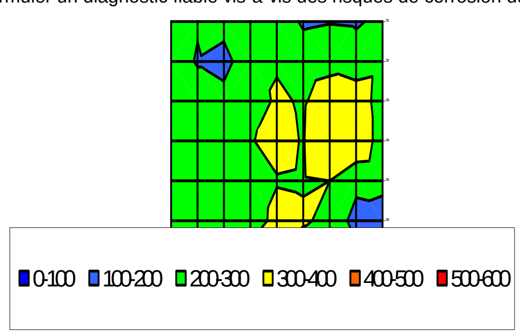
7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

Les résultats sont donnés par zones auscultées.

Le compte-rendu de la mesure de potentiel d'armature doit comprendre :
- La date de l'intervention, conditions d'intervention
- L'identification de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage et de la zone testée
- Les conditions (température, hydrométrie)
- L'exposition et l'environnement des zones auscultées
- La localisation des dégagements d'armatures pour le contact électrique
- Un tableau indiquant le maillage des armatures et les valeurs du potentiel
- Représentation graphique sous forme d'iso potentiels pour la localisation des zones corrodées
- Estimation du pourcentage de surface entrant dans chaque domaine défini par la norme ASTM C 876-91

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

La méthode de mesures de potentiel d'électrode permet d'obtenir une cartographie de la probabilité de corrosion des armatures d'une zone de béton armé donnée. Associée aux méthodes évoquées ci-dessus elle permet de formuler un diagnostic fiable vis-à-vis des risques de corrosion du béton armé.



9) Prix

Le prix dépend :
- De la surface des zones à ausculter
- Des moyens d'accès pour réaliser les mesures
- De l'amortissement du matériel
- Du déplacement du laboratoire au site
- De la vacation de personnel sur site et en laboratoire

10) Référence biblio, normatives

Norme ASTM C 876-91 : Half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete

RILEM TC 154: Electrochemical Techniques for Mesuring Corrosion of steel in concrete

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un essai au piézocône

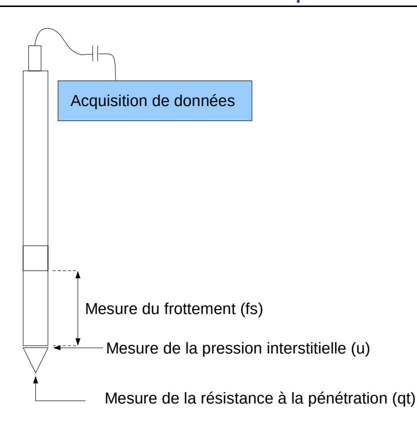


Schéma du piézocône

1) Nom de la méthode

Réalisation d'un essai au piézocône.

2) Description : principe de la méthode

Cette méthode consiste à enfoncer dans le sol, sans choc ni vibration, à vitesse imposée, une pointe piézoconique, par l'intermédiaire d'un train de tiges qui lui est solidaire et à mesurer, de façon continue, la résistance apparente à la pénétration du cône q_c et la pression interstitielle de pénétration u.

Il est possible de mesurer l'effort total en tête Q_t, ainsi que l'effort de frottement latéral local Q_s sur un manchon de frottement situé immédiatement au-dessus du cône.

3) Domaine d'application

L'essai au piézocône s'applique à tous les sols fins et aux sols grenus dont la dimension maximale des éléments ne dépasse pas 20 mm, à condition qu'ils soient, in-situ, sous le niveau de la nappe.

4) Mode opératoire:

Généralités :

Le mode opératoire comprend les étapes suivantes :

1- Préparation

- Les points de sondages sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (nom du sondage, opérateur, date, numéro de dossier…) sont notées.
- Les étalonnages et vérifications des différents constituants et du matériel de mesure doivent être réalisés périodiquement. Ils sont décrits dans l'Annexe A de la norme NF P 94-119
- Des vérifications soignées des joints de protection de la pointe sont réalisées.
- La pointe est saturée.
- Au droit du futur sondage, un avant trou est réalisé jusqu'à environ 0,30 m sous le niveau de la nappe.
- La pression hydrostatique u_0 est estimée en repérant le niveau de la nappe dans un système référencé.

2- Réalisation de l'essai

L'essai consiste à réaliser, souvent simultanément, les manipulations suivantes :

- faire coïncider l'axe du train de tiges avec celui de l'effort de fonçage,
- enfoncer les tiges et la pointe verticalement, avec une inclinaison maximale tolérée en surface de 2 % par rapport à la verticale. Un arrêt doit être fait après une pénétration de 0,50 m à 1 m sous le niveau de la nappe pour stabiliser la température du cône,
- s'assurer que la structure reste stable,
- vérifier que la vitesse de pénétration reste constante sur une longueur minimale de 0,8 m durant l'enfoncement de la pointe. La vitesse de fonçage doit approcher les 20 (± 5) mm/s,
- après une pénétration de 3 m dans le sol en place saturé, faire un arrêt du fonçage pour déterminer la variation Δu de la pression interstitielle en fonction du temps, afin de contrôler la qualité de désaération du filtre et du circuit de mesure de u.

Une lecture continue de l'ensemble des données est recommandée. L'intervalle de profondeur entre deux ensemble de lecture consécutifs ne doit, en aucun cas, être supérieur à 5 cm.

Matériels :

- Matériel de forage
- Piézocône équipé des appareils de mesures en fonction des informations à recueillir.

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

Tout essai doit se trouver à au moins 2 m d'un autre essai ou forage non tubé et non rebouché déjà réalisé.
Les tolérances d'utilisation sont données dans le tableau de l'Annexe B de la norme NF P 94-119.
Les incertitudes de mesures consistent en :

- l'incertitude sur la longueur de pénétration ne doit pas excéder 1/100
- l'incertitude maximale tolérée sur les autres paramètres est la plus petite des valeurs suivantes :
  - 5 % de la valeur mesurée
  - 1 % de la valeur maximale du domaine de mesure

6) Auscultations complémentaires:

Les essais au piézocône peuvent être complétés par des sondages de reconnaissance destructifs ou carottés qui permettront d'obtenir une coupe précise géologique des terrains à étudier et permettront l'échantillonnage des matériaux en vue d'éventuels essais de laboratoire.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

Lors de l'essai, les lectures et leur saisie comprennent :

Obligatoirement :

- la profondeur,
- l'effort apparent sur le cône Q_c,
- la pression interstitielle u.

Eventuellement :

- l'effort total de pénétration Q_t,
- l'effort de frottement latéral local Q_s,
- l'inclinaison de la pointe,
- l'évolution de la pression interstitielle en fonction du temps après chaque arrêt de fonçage.

On obtient ainsi des graphiques représentant en fonction de la profondeur :

- la résistance à la pénétration du cône q_t, en MPa,
- la pression interstitielle en MPa
- le frottement latéral unitaire local f_s, en MPa,
- le rapport de frottement R_f.

Le graphique ci-contre est un exemple de profils de mesures obtenues avec le piézocône.

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

A partir des paramètres mesurés, l'essai au piézocône permet d'apprécier :

- la succession des différentes couches de terrain et éventuellement leur nature,
- l'homogénéité d'une couche ou la présence d'anomalies, notamment de réaliser la distinction entre couches argileuses et sableuses,
- certaines caractéristiques des sols traversés.

Il est ainsi possible de réaliser des dimensionnement de pieux, des études de stabilité de talus naturels, de glissements de terrain et de conception de remblais.

9) Prix

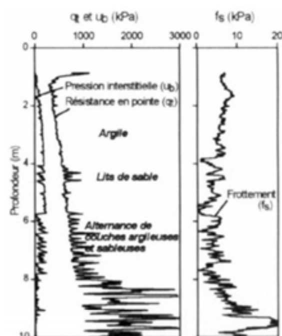
Le prix dépend :

- du nombre et de la profondeur des essais au piézocône,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

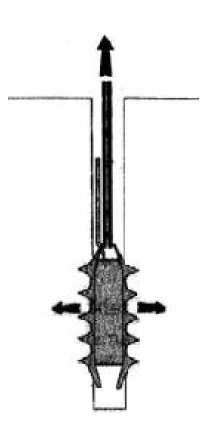
10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-119 : Sols : Reconnaissance et Essais – Essai au piézocône
Norme NF P 94-500 : Missions géotechniques – Classifications et spécifications

« Le piézocône, améliorations apportées à la reconnaissance des sols » Louis PAREZ et Roger FAURIEL. Revue Française de Géotechnique n°44, pages 13, 27 (juillet 1988).



FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un essai de cisaillement au phicomètre



Vue schématique du phicomètre (Reiffsteck 2002)

1) Nom de la méthode
Réalisation d'un essai de cisaillement au phicomètre.

2) Description : principe de la méthode
La présente méthode a pour objet de connaître in-situ la résistance au cisaillement du terrain, en dilatant, sous pression radiale contrôlée, une sonde annelée cylindrique ancrée au sein du sol après forage préalable et en mesurant l'effort nécessaire pour l'arracher selon sa direction axiale.

3) Domaine d'application
La méthode s'applique

- à tous les types de sols naturels saturés ou non à l'exception des vases, argiles molles et sols très lâches, des roches peu altérées et des sols comportant une prédominance de blocs de diamètre supérieur à 150 mm,
- aux remblais et sols artificiels avec les mêmes limites que précédemment,
- aux essais effectués à une profondeur inférieure ou égale à 30 m.

4) Mode opératoire:
Généralités :

Il s'agit de mesurer par paliers de pression radiale constante, un effort d'arrachement limite nécessaire pour cisailler le sol.

Le mode opératoire se résume en quatre grandes étapes :

1- Forage avec tubage éventuel

La technique et l'outil de forage employés dépendent de la nature du sol, de l'état des terrains rencontrés et du niveau de la nappe, afin de remanier le moins possible le sol au voisinage de la sonde,

2- Descente de la sonde au niveau de l'essai

Un étalonnage et calibrage de la sonde doivent être réalisés préalablement à l'essai.

3- Dilatation radiale de la sonde

sous une pression suffisante pour faire pénétrer les anneaux de la sonde dans le sol,

4-Traction axiale sur la sonde

augmentée progressivement de façon à maintenir constante la vitesse de déplacement axial

Les points de sondage sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (opérateur, date, numéro de dossier, type de sonde, cote de l'essai, niveau piézométrique…) sont notées.

Conditions particulières :

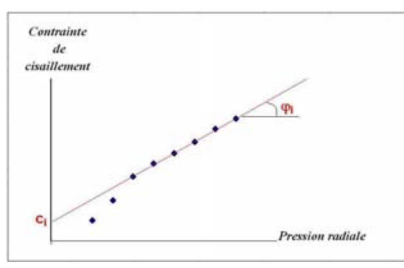
La technique et les outils de forage employés dépendent de la nature et de l'état du terrain (il est indispensable de remanier le moins possible le sol au voisinage de la sonde).

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- L'essai au phicomètre permet, in-situ, d'obtenir les paramètres de résistance au cisaillement de sols dont il est difficile de prélever des échantillons intacts (afin de les soumettre au essais de laboratoire comme l'appareil tri-axial ou la boite de cisaillement).
- Les sondages doivent être représentatifs de la zone à étudier.
- La réalisation et la qualité de l'essai sont liées à celles d'un forage phicométrique dans lequel est introduite la sonde.
- Les incertitudes de mesures sont les suivantes :
  - l'incertitude sur la distance entre le milieu de zone de mesure et le sommet du forage avant le début de l'essai ne doit pas excéder la plus grande des deux valeurs : 10 cm ou 1/100 de la longueur des tiges de liaison,
  - l'incertitude sur la mesure du volume du liquide introduit dans la cellule : inférieure ou égale à la plus grande des deux valeurs : 2 cm^3 ou 1% de la valeur lue,
  - l'incertitude sur la mesure du diamètre extérieur de la sonde doit être inférieure à 0,1 mm,
  - en tenant compte de la résistance propre de la membrane, de la pression hydrostatique à l'intérieure de la tubulure et de celle régnant dans le forage, l'incertitude sur la pression est la plus petite des deux valeurs :
    5 % de la valeur mesurée ou 1 % de la valeur maximale du domaine de mesure,
  - l'incertitude sur la mesure de l'effort d'arrachement est la plus grande des deux valeurs : 250 N ou 1 % de la valeur lue,
  - l'incertitude sur la vitesse de déplacement doit être inférieure ou égale à 0,2 mm/min au-delà du premier palier,
  - l'incertitude sur le déplacement axial mesuré au niveau de la surface du sol par rapport à un repère fixe doit être inférieure ou égale à 0,2 mm.

6) Auscultations complémentaires:
Les sondages phicométriques peuvent être complétés par des sondages de reconnaissance destructifs ou carottés qui renseigneront sur l'éventuelle hétérogénéité des terrains à étudier.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)



Les couples de mesures pression radiale / contrainte de cisaillement permettent de tracer la ***droite de cisaillement*** (voir graphique ci-contre), dont

- l'ordonnée à l'origine est la valeur de la **cohésion c_i**,
- la pente correspond à la tangente de **l'angle de frottement φ_i**.

On obtient également

- la ***courbe de dilatation*** de la sonde (différence de volume injecté entre le début et la fin de la phase d'arrachement en fonction du palier de pression)
- la ***courbe de chargement*** (évolution du volume injecté dans la cellule de mesure en fonction de la pression des paliers successifs)

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Il est alors possible d'apprécier la succession des couches de sols et éventuellement leur nature et de définir les caractéristiques de résistance au cisaillement utilisables dans le dimensionnement de certains ouvrages ou des études de stabilités de déblais ou de stabilisation de glissements de terrains, par exemple.

Suivant le type de mission géotechnique réalisée (selon la norme NF P 94-500 de classification des missions géotechniques), le compte-rendu de l'opération de sondages phicométriques comprendra les éléments suivants :

- un rappel de la commande,
- la reconnaissance de terrain (Description du contexte géologique, de l'intervention sur le terrain, des résultats des sondages…),
- les plans de situation et d'implantation des sondages,
- les coupes géologiques des forages comportant :
  ° nature et niveau des différentes couches de terrain traversées,
  ° venues d'eau constatées à l'exécution des forages,
  ° paramètres techniques de forage (mode, outil, tubage),
  ° valeurs des paramètres de cisaillement obtenus (cohésion in situ c_i et angle de frottement insitu φ_i)

9) Prix
Le prix dépend :

- du nombre, du linéaire et du type de sondage,
- du nombre d'essais de cisaillement et de leur profondeur,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de forage,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

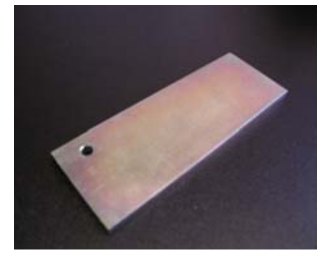
10) Référence biblio, normatives
Norme XP P 94-120 : Sols : Reconnaissance et Essais – Essai de cisaillement au phicomètre

Norme NF P 94-500 : Missions géotechniques – Classifications et spécifications

REIFFSTECK Ph. (2002) Nouvelles technologies d'essai en mécanique des sols. État de l'art. (Compte-rendu du Symposium international Identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques PARAM 2002, Presses de l'ENPC / LCPC, Paris, pp. 201-242)

FICHE DE METHODE D'INVESTIGATION :
Nivelle LPC à vis micrométrique


Nivelle LPC à vis micrométrique


Embase unidirectionnelle

1) Nom de la méthode

Mesures de rotation par nivelle mécanique LPC à vis micrométrique

2) Description : principe de la méthode

Ce matériel convient pour suivre les mouvements de sols instables ainsi que pour suivre l'évolution de la stabilité d'appuis de structures ou de déformations en rotation d'ouvrages. Les suivis peuvent être effectués selon les axes longitudinaux et/ou transversaux

3) Domaine d'application

Suivi de sols instables, de structures en maçonnerie, en acier, en béton ou en bois.

4) Mode opératoire :

La mise en œuvre de ce système implique la mise en place d'embases collées au préalable sur la structure (respecter le temps de séchage des produits de collage avant la mesure initiale). Dans un environnement maritime, il est recommandé d'utiliser des embases en acier inoxydable. Ces embases sont fixées, suivant deux axes perpendiculaires horizontaux, sur la structure ou sur une équerre rigide indéformable fixée sur la structure. Le réglage horizontal de ce support est vérifié avec un niveau ordinaire de façon à rester dans la plage de mesure de la vis micrométrique.

Avant toute mesure, nettoyer l'embase de mesure et la platine de la nivelle,
Placer la nivelle en positionnant la cornière de la platine le long de l'embase de mesure,
Vérifier que la platine est bien calée avec les cornières en butée sur l'embase,
Régler la vis micrométrique de façon à caler la bulle à zéro,
Position 1 : trous repères de la platine et de la nivelle en coïncidence = lecture1,
Position 2 : retourner l'ensemble de 180° = lecture 2
Après avoir effectué les lectures des mesures sur la vis micrométrique, vérifier que la 1/2 somme des lectures ((L1 + L2)/2) reste constante dans le temps.
La mesure est égale à la demi-différence des lectures (L1 – L2)/2.
Nota : Sur des structures soumises au phénomène des marées, il est conseillé d'effectuer les mesures de suivi selon des marées similaires (hauteur de pleine mer et de basse mer approchantes de la mesure initiale) et de réaliser ces mesures au même niveau de la marée qu'au jour des mesures initiales.

5) Domaine de validité

La précision permet de déceler une rotation de l'ordre de 20" d'arc (10^{-4} rad)

6) Auscultations complémentaires

Distancemétrie
Piézomètre

7) Résultats :

Le compte-rendu de mesures au distancemètre à fil d'invar doit comprendre :

- La date et l'heure de la mesure et conditions d'intervention
- L'identification de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage et de la base mesurée
- La température ambiante
- Les conditions de la marée (niveau de la PM et la BM, et hauteur d'eau lors de la mesure)
- Les valeurs de la mesure initiale et les valeurs des mesures de suivis antérieurs
- Une représentation schématique de l'implantation des bases de mesures sur l'ouvrage

8) interprétation des résultats

La valeur de l'angle en radians est égal à : $\alpha = H/L$ (quand a est petit, alors $\alpha \approx \text{tg}\,\alpha$ et $\text{tg}\,\alpha = H/L$ d'ou $\alpha=H/L$) avec $H =(L1 - L2)/2$ et $L = 100^{\pm 1mm}$ (longueur de la base).
Le suivi de mesure permet l'évaluation des variations de rotation dans le temps.
La présente méthode permet de suivre l'évolution de mouvements de sols instables ou de la stabilité d'appuis de structures ou de déformations d'ouvrages, tant que les embases ne sont pas déteriorées.

9) Prix

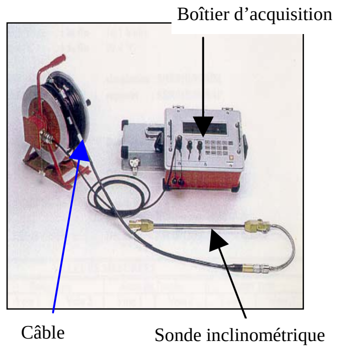
Le prix de cette prestation se décompose comme suit :

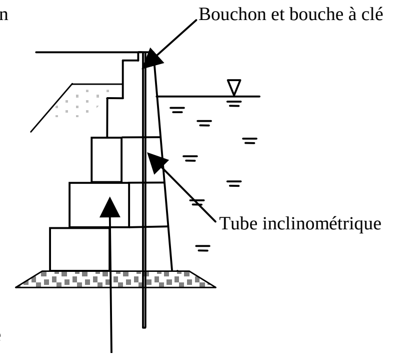
- de la préparation de l'instrumentation (pré-visite d'ouvrage, définition du plan d'instrumentation, commande de matériel pour l'instrumentation)
- de l'acquisition de matériel (embase acier ou acier inoxyudable a mesure unidirectionnelle (X ou Y) ou bi-directinnelle (XY), colle…)
- de la mise en place de l'instrumentation (scellement des équerres, ou collage selon la configuration de pose des embases et mesure initiale)
- temps passé par le personnel (2 personnes)
- amortissement du matériel et des étalonnages du matériel (vis micrométrique)
- prix de déplacement du laboratoire au site instrumenté,
- temps passé pour le traitement des données et la réalisation d'un compte rendu de mesures.

10) Référence bibliographique

Notice d'utilisation de la nivelle LPC à vis micrométrique
Fiche d'information OA ED E2 4.1.5 d'avril 2000.

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Mesures à l'inclinomètre





1) Nom de la méthode

Mesures à l'inclinomètre

2) Description : principe de la méthode

La présente méthode s'applique à la détermination des mouvements d'un tube de mesure non vrillé, s'écartant peu de la verticalité ou de l'horizontalité, fixé soit sur ou dans une structure, soit placé au sein d'un massif de sol mou, compact ou rocheux.
Les mesures à l'inclinomètre ont pour but d'évaluer les déplacements du tube solidaire du sol ou de la structure dans le temps par rapport à une des extrémités supposée fixe ou dont la position est connue par ailleurs.

3) Domaine d'application

Il s'agit de suivre soit des structures en maçonnerie ou en béton mais également de suivre des remblais ou des terrains

4) Mode opératoire :

La mise en œuvre de ce système implique la réalisation d'un forage préalable (qui peut être également entrer dans le cadre d'un prélèvement de matériaux en vue de réalisation d'une coupe de terrain ou de structure) dans lequel sera scellé un tube de dimension 40*40 mm ou un tube cylindrique rainuré adapté au matériel inclinométrique utilisé.
Le passage du gabarit (fausse sonde) géométriquement identique à la sonde inclinométrique permet de s'assurer de la libre circulation de la sonde dans le tube.
Le matériel inclinométrique est composé d'une sonde inclinométrique reliée à une centrale d'acquisition par l'intermédiaire d'un câble monté sur enrouleur et gradué tous les 0,50 mètre.
La centrale d'acquisition alimente la sonde, acquiert la profondeur, la température et les angles de la sonde par rapport à la verticale suivant deux axes orthogonaux Elle permet à l'opérateur de valider les données pour chaque point de mesure et peut mémoriser un millier de mesures avant transfert sur micro-ordinateur. A l'issue de la période d'acquisition des mesures, les résultats sont ensuite exploités par un logiciel approprié.
Pendant la phase de mesure, la sonde est descendue dans le tube prévu à cet effet et remontée manuellement tous les 0,50 mètres en 2 passages successifs avec retournement de la sonde à 180°. A chaque palier de 0,50 mètre est effectué une mesure, mesure validée par un opérateur sur la centrale d'acquisition
Lorsque l'ouvrage instrumenté est soumis à l'action de la marée, il est recommandé :
au moins pour la première mesure d'effectuer sur chaque tube plusieurs mesures à différentes hauteur d'eau afin d'évaluer l'action de la marée sur la structure instrumentée et de définir le moment propice de la marée pour effectuer les mesures de suivi,
d'effectuer les mesures de suivi selon des marées similaires (hauteur de pleine mer et de basse mer approchantes de la mesure initiale.

La présence du tube inclinométrique sera signalée et sera repérée sur un plan de situation.

Matériels :

- Profilés creux de section carrée de 40*40mm ou un tube rainuré de 50 mm de diamètre
- Bouchon placé à la partie inférieure du tube inclinométrique
- Couvercle amovible de protection de la partie supérieure du tube
- Gabarit (fausse sonde)
- Sonde inclinométrique
- Câble
- Boîtier d'acquisition

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

La résolution de la mesure doit être supérieure à $1*10^{-4}$ radian. L'intervalle de répétabilité des mesures à ± 2 écarts-types doit être supérieur à ± $4*10^{-4}$ radian.

Les mesures ne peuvent être réalisées qu'après durcissement complet du coulis de scellement.

6) Auscultations complémentaires:

La périodicité des relevés inclinométriques est déterminée en fonction de l'objectif de l'étude. Dans le cas de structures soumises à la marée, un suivi sur un cycle (haute et basse mer) et selon différents cas de marées (vive eau, morte eau…) permet d'obtenir un profil de déplacement de la structure selon l'action de la marée. Les mesures de suivi seront réalisées selon des conditions de marées similaire à celles réalisées pour la mesure initiale.

Les mesures à l'inclinomètre peuvent être couplées avec les mesures au distancemètre à fil invar afin de détecter et d'évaluer un éventuel glissement en tête ou en pied de tube.

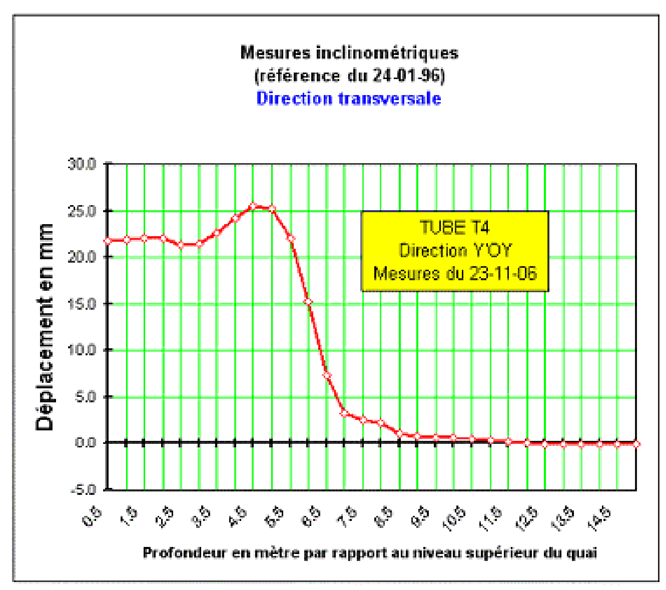
7) Résultats : (type, ordre de grandeur,…)

Le procès verbal comporte les informations suivantes :

- Le numéro de l'affaire, les dates et heures des mesures,
- Le nom de l'opérateur qui a réalisé les mesures,
- La référence de l'appareillage et la date de la dernière vérification effectuée,
- L'implantation du tube de mesure, les coordonnées de sa tête par rapport à un repère, les directions des mesures,
- La longueur du tube, sa position après la pose, la position des raccords,
- La représentation graphique des variations d'inclinaison et de la profondeur,
- les différentes autres observations (incidents et détails opératoires).

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Les résultats sont principalement restitués sous forme graphique. Les résultats obtenus sont les variations angulaires et par intégration les déplacements du tube.



9) Prix

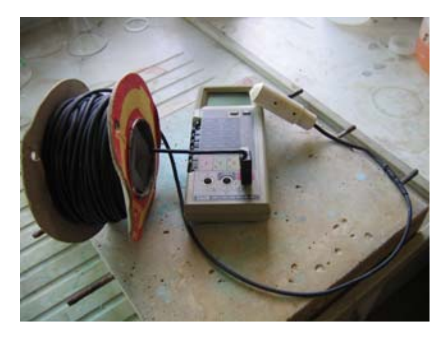
Le prix dépend :

- du nombre et du linéaire de forages à réaliser,
- du nombre et du linéaire du type de tube à poser,
- des équipements (tubage, bouchons, matériaux…),
- de la périodicité des relevés prévus dans le suivi inclinométrique,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de forage,
- -de l'amortissement du matériel de mesure inclinométrique,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-156 : Sols : Reconnaissance et Essais – Mesures à l'inclinomètre

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Mesures de potentiels électrochimiques sur une structure métallique immergée



1) Nom de la méthode

Mesures de potentiels électrochimiques

2) Description: principe de la méthode

La présente fiche décrit la méthode pour évaluer l'état de corrosion d'une structure métallique immergée. En effet, le potentiel électrochimique de l'acier varie en fonction du comportement du métal à un endroit donné : Si le métal fonctionne comme cathode (receveur d'électrons) , le potentiel est plus bas que lors d'un comportement anodique (donneur d'électrons). Par mesure sur site à l'aide d'une cellule électrochimique adaptée, on peut déterminer le potentiel d'une structure métallique en divers endroits et connaître l'état de l'acier d'après la norme NF EN 12 473. Pour être protégé, un acier doit toujours jouer le rôle de cathode. En règle générale on l'utilise dans les sites sous protection cathodique, pour vérifier que la protection est valable en tout point de l'ouvrage, lorsque l'on ne tolère pas de perte de métal sur la structure.

3) Domaine d'application

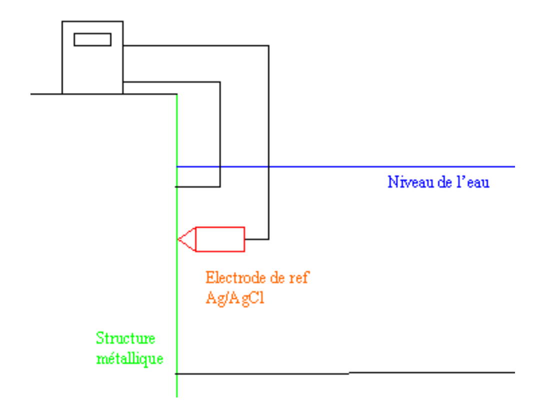
Cette méthode s'inscrit dans le cadre d'un diagnostic des structures métalliques immergées.

La cellule électrochimique est composée des deux électrodes que sont : la structure d'une part, l'électrode de référence utilisée pour la mesure d'autre part. Opérer à une mesure de potentiel revient à estimer la FEM qui s'établit localement entre ces deux électrodes, le résultat dépend donc de l'électrode de référence utilisée, et de l'état de polarisation de l'acier à l'endroit ou l'on mesure.

En site maritime, on utilise une électrode de référence Ag/AgCl, l'eau de mer chargée en NaCl devenant ainsi l'électrolyte nécessaire à la mesure.

4) Mode opératoire:

<u>Généralités :</u>
Les mesures ne sont réalisables que sous certaines conditions :
Compatibilité de l'électrode de référence avec l'électrolyte en présence
Étalonnage de l'électrode de référence
<u>Conditions particulières :</u>
Préparation de la surface tester
La surface de mesure doit être aussi propre que possible
Réalisation de la prise de contact sur la structure
Le contact avec la structure est assuré à l'aide d'une pince crocodile reliée au millivoltmètre.
Réalisation des mesures
On déplace l'électrode le long de la surface à ausculter, en prenant une mesure sur le voltmètre tous les 20 à 30 cm.



Matériels :
- Électrode de référence Ag/AgCl, lestée.
- Câble de liaison, pince crocodile
- Voltmètre haute impédance (10 MOhms minimum)
- mètre, décamètre, craies,…
- Appareil photo

NB : Il existe des « pistolets » mesureurs de potentiel étalonnés en fonction du milieu qui permettent de faire la mesure directement. La lecture est alors faite en direct par le plongueur.

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

La présente méthode s'applique sur des structures immergées. La norme NF EN 12 473 donne une valeur de potentiel en dessus de laquelle l'acier n'est plus protégé (en ref. à l'électrode Ag/AgCl)

Elim = -0.8 V

La valeur du potentiel de l'électrode d'argent peut varier dans une marge approximative de +- 2.5 mV en fonction des conditions physico-chimiques du milieu. Sur une zone particulière, les conditions seront les mêmes.

6) Auscultations complémentaires:

On peut réaliser des mesures d'épaisseurs résiduelles de métal, qui indiqueront les endroits de la structure ayant subi des dommages. On peut ainsi comparer les zones sous corrosion et celles déjà affaiblies, on cartographie ainsi la gravité des désordres observés.

On peut également y associer des mesures de courants vagabonds, ainsi que les mesures classiques de bathymétrie et de relevés visuels de la corrosion.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

Les résultats sont donnés par zones auscultées.

Le compte-rendu de la mesure de potentiel structure immergée doit comprendre :

- La date de l'intervention, conditions d'intervention
- Les mesures de potentiels données en mV
- L'identification de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage et de la zone testée
- Les conditions (température, hydrométrie), éventuellement un prélèvement d'eau du milieu
- L'exposition et l'environnement des zones auscultées
- Un schéma indiquant le maillage des mesures
- La détermination des points non protégés

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Si l'on observe un changement local des potentiels sur la structure, le reste étant correctement protégé, on peut penser à une « fuite de courant » de l'ouvrage vers un point de potentiel plus faible. Ces courants de fuite sont dits « courants vagabonds » et se mesurent dans l'eau, en regardant le gradient de potentiel dans différentes directions, par simple déplacement de l'électrode dans le milieu.

Au contraire, une valeur de potentiel élevée de manière généralisée sur toute une partie d'ouvrage sera signe d'un vieillissement ou d'un dysfonctionnement de la protection cathodique de la structure.

9) Prix

Le prix dépend :

- De la surface des zones à ausculter
- Des moyens d'accès pour réaliser les mesures
- De l'amortissement du matériel
- Du déplacement du laboratoire au site
- De la vacation de personnel sur site et en laboratoire

10) Référence biblio, normatives

Norme NF EN 12 473 : principes généraux de la protection cathodique en eau de mer

Norme **NF EN 12495** : protection cathodique des structures en acier fixes en mer.
CETMEF: La protection contre la corrosion des structures métalliques immergées
CSTB, François DERRIEN : La corrosion des matériaux métalliques dans le bâtiment

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Inspections subaquatiques



1) Nom de la méthode

Inspection subaquatique de structures immergées

2) Description: principe de la méthode

L'inspection subaquatique d'un ouvrage est une méthode d'investigation utilisée dans le domaine maritime comme dans le domaine fluvial.
L'intervention de plongeurs professionnels qualifiés en inspection d'ouvrages d'art (formation PFE) permet de présenter un diagnostic sur les parties immergées d'un ouvrage.

3) Domaine d'application

L'objectif est de connaître avec précision les désordres affectant les parties immergées d'un ouvrage, du point de vue de la structure, des matériaux et de l'environnement immédiat (affouillement local). A la pure inspection visuelle peuvent s'ajouter des techniques d'auscultation particulières au milieu aquatique.
Ces inspections et auscultations sont à pratiquer régulièrement pour s'assurer du bon état des ouvrages fluviaux et maritimes. Elles peuvent également être le point de départ d'études spécifiques visant des ouvrages particuliers dont on désire appréhender le fonctionnement.

4) Mode opératoire:

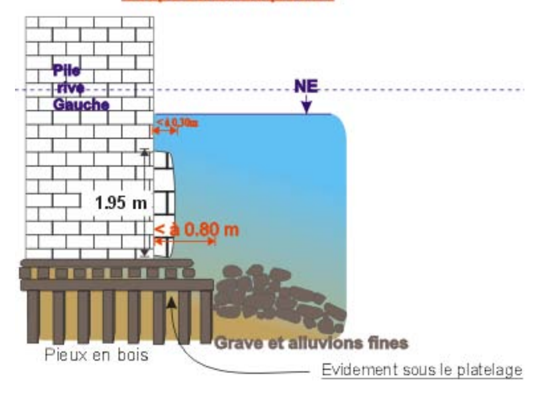
L'inspection subaquatique implique un travail en milieu hyperbare, et se trouve sous le coup de la juridiction réglementant ces travaux.
Une règle particulièrement importante de cet ensemble (voir le manuel des travaux hyperbares du SNETI) est celle régissant la composition des équipes.

Une équipe doit au moins comporter :

- Un plongeur en immersion
- Un plongeur secours
- Un Chef d'Opération Hyperbare

Ces conditions étant requises, les modalités possibles d'intervention sont diverses. Couramment le plongeur/inspecteur travaille seul, mais il est possible de poster simultanément deux plongeurs dans l'eau, dans des conditions de visibilité adéquates ; dans ce cas la présence d'un troisième plongeur (de secours) en surface est nécessaire.
L'inspecteur peut travailler en scaphandre autonome (bouteilles d'air comprimé) ou au narguilé (alimentation en air depuis la surface). La durée maximale de plongée est de 3 heures par jour pour chaque plongeur.
Le choix de la méthode dépend des conditions d'interventions et de la mission confiée.

Les constatations sont en général reportées sur des planches techniques, qui accompagnent un rapport écrit d'inspection, comme pour les inspections d'ouvrage aérien. Ce rapport comporte une conclusion sur l'état de l'ouvrage, propose des investigations complémentaires si elles sont nécessaires et peut proposer des solutions de réhabilitation, le cas échéant.



Matériels :

- Équipement de plongée : bouteilles, combinaisons sèches et humides, narguilé,…
- Moyen d'accès : zodiac, barque
- Matériel de relevé : craie grasse, planchette immergeable, appareil photo, vidéo, cône d'eau claire…

- Matériel d'auscultation léger : Fissurotest, Inclinomètre à main, mesureur de potentiels, mesureur d'épaisseur résiduelle de métal.
- Courantomètre
- Matériels de fixations subaquatiques
- Phare étanche

5) Domaine de validité (sensibilité, contre-indication..)

L'inspection visuelle proprement dite nécessite une visibilité minimum de 30 cm.

Dans les eaux plus troubles, des investigations par plongeurs peuvent également être menées : on parlera alors d'inspections visio-tactiles. Les résultats de ces inspections sont plus parcellaires, mais permettent néanmoins de sonder les points critiques de certaines structures avec précision (affouillements sur pile de pont, éventrements de palplanches…). Une concertation entre le gestionnaire et l'équipe de plongeurs aura alors lieu afin de déterminer précisément l'objectif des travaux.

En présence de trop fort courants (> 0.8 m/s), on reportera l'inspection.

6) Auscultations complémentaires:

L'inspection visuelle subaquatique permet de relever les désordres sur une structure.
Elle peut se coupler à des auscultations non destructives en fonction du type d'ouvrage intéressé :

Mesures d'épaisseur résiduelle de métal
Mesure de potentiels de corrosion sur OA métalliques
Mesure de potentiel sur armatures de bétons immergés
Mise en place de capteurs de déplacements submersibles pour instrumentation
Mesures au fil d'invar
Prélèvements d'eau
Carottages de béton
Réalisation de film
Bathymétrie des abords de l'ouvrage

relevé bathymétrique

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

Le compte-rendu de l'inspection subaquatique doit comprendre :

- Les conditions de visibilité et de courant le jour de la visite
- Les caractéristiques de l'ouvrage et de son site
- Le relevé détaillé et commenté des désordres
- Le positionnement des désordres sur une planche technique de l'ouvrage
- Les photographies des désordres
- Les relevés bathymétriques (précision de l'ordre du mètre en positionnement)
- La conclusion sur l'état de l'ouvrage et les actions à mener pour assurer sa pérennité.

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

La lecture du rapport d'inspection détaillée permet de choisir une politique de gestion de ses ouvrages, en toute connaissance de cause.

9) Prix

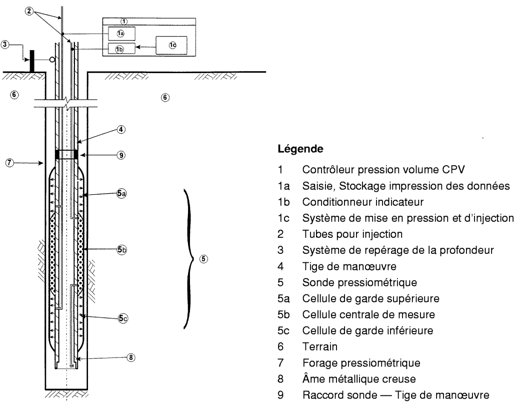
Le prix dépend :

- du nombre de jours d'inspection (fonction des conditions d'intervention)
- de l'amortissement du matériel et des produits
- du déplacement du laboratoire au site
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire

10) Référence biblio, normatives

Instruction technique de 1979 du ministère de l'équipement : sur la surveillance et l'entretien des OA. Fasc. 10 « fondations en site aquatique »
CETMEF : Guide méthodologique « inspection et auscultations de structures immergées » (à paraître)
Réseau LPC, EDOA : Procédure EDOA 8.1 « évaluation de l'état d'une structure en site immergé »

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un essai pressiométrique



1) Nom de la méthode

Réalisation d'un essai pressiométrique

2) Description : principe de la méthode

La présente méthode a pour objet de déterminer in-situ la résistance et la déformabilité des sols par dilatation d'une sonde cylindrique tricellulaire. Chaque essai aboutit à la détermination d'un module de déformation pressiométrique et d'une pression limite.

3) Domaine d'application

L'essai pressiométrique constitue l'un des principaux essais de reconnaissance des sols en place. Il permet de caractériser les sols naturels et remblais traités ou non, les sols indurés et les roches tendres, tant en site terrestre qu'en site aquatique.

4) Mode opératoire :

Généralités :

- Il s'agit de mesurer et enregistrer les pressions appliquées (par paliers) par la sonde et ses variations volumiques (à intervalles réguliers), afin de déterminer la relation entre la pression appliquée et l'expansion de la sonde.
- Un étalonnage et calibrage de la sonde doivent être réalisés préalablement à l'essai.
- La réalisation et la qualité de l'essai sont liées à celles d'un forage préalable dans lequel est introduite la sonde pressiométrique.
- Les points de sondage sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (opérateur, date, numéro de dossier, type de sonde, cote de l'essai, niveau piézométrique…) sont notées.

Conditions particulières :

La technique de forage et le type de sonde employés dépendent de la nature du terrain (la sonde peut y être introduite directement par vérinage ou battage) :

Nature des terrains	Forage préalable									Refoulement
	Rotation *					Battage et autres				
	TAM	TIN	THC	O DG IN	CAR	ROTOP	CAR BAT	CA R VBF	TF EM	TF BAT/VBF
Vase et argiles molles	-	R°	-	O°	-	-	O CPM F	-	-	-
Argiles moyennement compactes	R	R°	R	R°	-	O°	-	-	O	-
Argiles compactes , marnes raides			R	R°	R°	O°	-	-	-	-
Limons - au-dessus de la nappe	R	O°	R	O°	-	O°	O	O	O	-
Limons - sous la nappe	-	R°	-	O°	O°	O°	-	-	O▲	-
Sables lâches - au-dessus de la nappe	R	R°	O	O°	-	O°	-	-	O	-
Sables lâches - sous la nappe	-	R°	-	O°	-	O°	-	-	-	O
Sables moyennement compacts et compacts	R	R°	R	R°	-	R°	O	O	O▲	O+
Sols grossiers, graviers, galets, argiles à silex,etc.			O	O°		R°	O	O	O	O+
Roches altérées Roches tendres			R	R	O	R°	O	O		O+

Méthodes de réalisation des forages pressiométriques

Légende :

R : Recommandé	TAM : Tarière à main (cuillère)	CAR : Carottier
O : Toléré	TIN : Tarière avec injection de boue de forage	ROTOP : Rotopercussion
- : Non toléré	THC : Tarière Hélicoidale Continue à sec	IN : Avec injection de boue
(case grisée) : Inadapté	O DG : Outil désagrégateur	BAT : Battage
	CPMF : Carottier à parois minces foncé	VBF : Vibrofonçage
	TF EM : Tube fendu avec enlèvement simultané des matériau	TF : Tube fendu

** : Vitesse de rotation < 60 tr/min et diamètre de l'outil inférieur ou égal à 1,15 d_s*
+ : Eventuellement, forage préalable en petit diamètre ($d_f < d_s$)
° : Injection avec boue (pression < 500 kPa ; débit < 15 l/min)
Dans le cas où le forage est fait par rotation, la pression (en tête du train de tiges transmise sur l'outil doit être inférieure à 200 kPa
▲ : Avec dispositions particulières (par exemple, imposer un gradient vertical descendant, réaliser les essais en descendant, prolonger le tube fendu par un tube de garde)

Matériels :

- Matériel de forage
- Sonde pressiométrique
- Contrôleur pression-volume (CPV) comportant :
- un système de mise en pression et de dilatation de la sonde,
- un dispositif de mesurage permettant la visualisation et l'enregistrement des valeurs mesurées sur un support physique.
- Tubes de raccordement de la sonde au CPV
- Système d'enregistrement des essais

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- Les sondages pressiométriques doivent être représentatifs de la zone à étudier.

- L'essai peut être réalisé dans le rocher, mais les caractéristiques obtenues sont alors affectées d'une plus grande incertitude compte tenu de l'appareillage et des très faibles déformations du terrain dans ce cas.

- Les incertitudes de mesures consistent en :

- l'incertitude sur la position de la sonde pressiométrique (l'incertitude sur la distance entre le milieu de la cellule de mesure et le sommet du forage pressiométrique ne doit pas excéder la plus grande des deux valeurs : 0,1 m et 1/100 de la longueur des tiges de manœuvre
- l'incertitude sur le volume du liquide introduit dans la cellule centrale : inférieure ou égale à 1 cm^3
- l'incertitude sur les pressions : inférieure ou égale à 15 kPa
- l'incertitude sur la durée : inférieure ou égale à 0,5 s.

L'essai doit être réalisé dans une couche de sol homogène et d'épaisseur au moins égale à la longueur de la sonde (0,8 m) et ne doit pas être réalisé à la limite entre 2 couches de sol différentes.

6) Auscultations complémentaires :

Les sondages pressiométriques peuvent être complétés par des sondages de reconnaissance destructifs ou carottés et par des sondages pénétrométriques qui renseigneront sur l'éventuelle hétérogénéité des terrains à étudier.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

L'enregistrement comporte, en plus des informations sur l'essai, une courbe pressiométrique brute représentant le volume en fonction de la pression.

Les valeurs des pressions et des volumes relevés au cours de l'essai doivent être corrigées afin de tenir compte de :

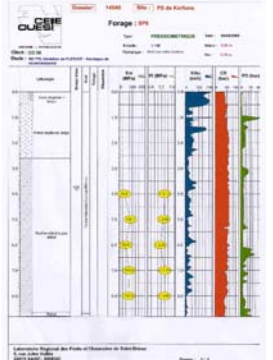
- la pression due à la charge hydraulique,
- la résistance propre de la sonde,
- l'expansion propre de l'appareillage sous l'effet des augmentations de pression (dilatation des tubes et du système de mesure, etc.)

On obtient ainsi une courbe pressiométrique corrigée à partir de laquelle vont être calculés :

- le module pressiométrique Ménard E_M,
- la pression limite pressiométrique P_l,
- la pression de fluage pressiométrique P_f.

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Il est alors possible de déterminer les caractéristiques de portance des sols investigués, les contraintes admissibles pour des fondations d'ouvrages d'art, bâtiments ou autres, d'évaluer des tassements, à l'aide de règles de calculs telles que le Fascicule 62 Titre V, le DTU 13.12 et DTU 13.2



Suivant le type de mission géotechnique réalisée (selon la norme NF P 94-500 de classification des missions géotechniques), le compte-rendu de l'opération de sondages pressiométriques comprendra les éléments suivants :

-Un rappel de la commande
-La reconnaissance de terrain (Description du contexte géologique, de l'intervention sur le terrain, des résultats des sondages…)
-Les éléments de fondation (Calculs des résistances au poinçonnement, résistances vis à vis des déformations (Tassements)…par exemple)
-Les plans de situation et d'implantation des sondages
-Les coupes géologiques comportant :
° nature et niveau des différentes couches de terrain traversées,
° venues d'eau constatées à l'exécution des forages,
° paramètres techniques de forage (mode, outil, tubage),
° valeurs des caractéristiques pressiométriques $\mathbf{E_M}$, module et $\mathbf{p_l}$, pression limite nette, reportées aux cotes des essais,
°enregistrements des paramètres de forage (Vitesse Instantanée d'Avancement, Couple de Rotation, Pression sur l'Outil).

9) Prix

Le prix dépend :

- du nombre, du linéaire, de la profondeur et du type de sondage,
- de la nature du sol à traverser,
- du nombre d'essais pressiométriques et de leur profondeur,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de forage,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-110-1: Sols : Reconnaissance et Essais – Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 : essai sans cycle
Norme NF P 94-500 : Missions géotechniques – Classifications et spécifications

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un essai de pénétration statique




Photo 1 : Pointe pour pénétromètre statique *Photo 2 : véhicule équipé en pénétromètre statique*

1) Nom de la méthode

Réalisation d'un essai de pénétration statique.

2) Description : principe de la méthode

Cette méthode consiste à enfoncer à vitesse constante verticalement dans le sol une pointe, munie d'un cône en partie inférieure, par l'intermédiaire d'un train de tiges qui lui est solidaire et à mesurer le résistance de pénétration de ce cône.

Il est possible de mesurer l'effort total de pénétration, ainsi que l'effort de frottement latéral local sur un manchon de frottement situé immédiatement au-dessus du cône.

3) Domaine d'application

L'essai de pénétration statique s'applique à tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 20 mm.

4) Mode opératoire:

Généralités :

- Les points de sondage sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (nom du sondage pénétrométrique, opérateur, date, numéro de dossier…) sont notées.
- Les étalonnages et calibrages des différents constituants et du matériel de mesure doivent être réalisés périodiquement. Ils sont décrits dans l'Annexe A de la norme NF P 94-113
- Des vérifications soignées de la pointe, des joints de protection des appareils de mesure sont réalisées.
- Il s'agit alors d'enfoncer verticalement dans le sol, sans choc, ni vibration, ni rotation, un train de tiges comportant à la base une pointe terminée par un cône.
- Les manipulations doivent être couplées à la vérification simultanée des paramètres indiqués par les appareils de mesures.

Matériels :

- Pénétromètre statique équipé des appareils de mesures en fonction des paramètres déterminer

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

Les incertitudes de mesures consistent en :

- l'incertitude sur la longueur de pénétration ne doit pas excéder 1/100
- l'incertitude maximale tolérée sur les autres paramètres est la plus petite des valeurs suivantes :
  - 5 % de la valeur mesurée
  - 1 % de la valeur maximale du domaine de mesure

6) Auscultations complémentaires:

Les sondages pénétrométriques peuvent être complétés par des sondages de reconnaissance destructifs ou carottés et par des sondages pressiométriques qui permettront d'obtenir une coupe géologique des terrains à étudier et renseigneront sur l'éventuelle hétérogénéité de la zone.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

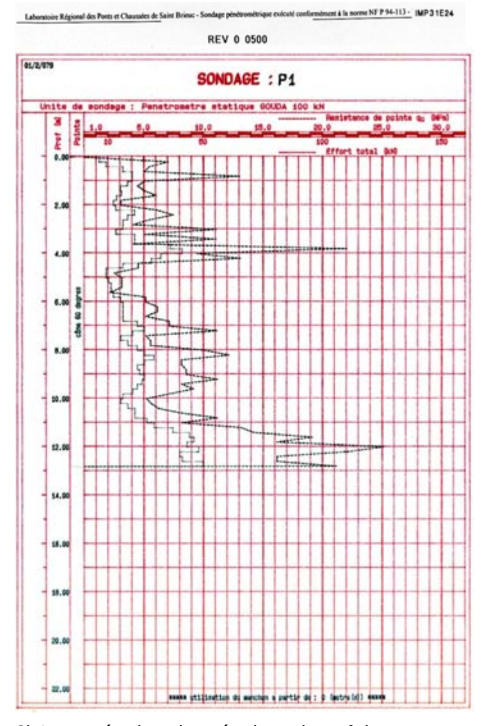
Au cours de l'essai, les appareils de mesure permettent de visualiser simultanément :

- la longueur de pénétration,
- la résistance à la pénétration du cône,
- le frottement latéral éventuel,
- l'inclinaison de la pointe éventuelle.

On obtient ainsi des graphiques représentant en fonction de la profondeur :

- la résistance apparente à la pénétration du cône q_c, en MPa,
- le frottement latéral unitaire local f_s, en kPa,
- le rapport de frottement R_f.

Le graphique suivant est un exemple de représentation de la résistance de pointe q_c (en MPa, en traits pointillés) et de l'effort total (en kN, en trait plein) :



8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

A partir des paramètres mesurés, l'essai de pénétration statique permet d'apprécier :

- la succession des différentes couches de terrain et éventuellement leur nature,
- l'homogénéité d'une couche ou la présence d'anomalies,
- certaines caractéristiques des sols traversés.

Suivant le type de mission géotechnique réalisée (selon la norme NF P 94-500 de classification des missions géotechniques), il est possible de déterminer la contrainte de rupture sous une fondation superficielle, la contrainte de rupture sous la pointe et le frottement latéral unitaire limite de fondations profondes d'ouvrages d'art, bâtiments …

9) Prix

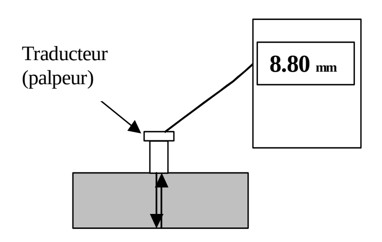
Le prix dépend :

- du nombre et du linéaire de sondage pénétrométrique,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de sondage,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-113 : Sols : Reconnaissance et Essais – Essai de pénétration statique
Norme NF P 94-500 : Missions géotechniques – Classifications et spécifications

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Mesure d'épaisseurs résiduelles de l'acier par ultrasons



1) Nom de la méthode

Mesures d'épaisseurs résiduelles de l'acier par ultrasons.

2) Description: principe de la méthode

Les mesures d'épaisseurs résiduelles ont pour but d'évaluer la corrosion des matériaux métalliques et ainsi de vérifier la capacité mécanique des pièces à reprendre les contraintes.
La méthode utilisée est basée sur la réflexion d'ondes ultrasonores dont la direction principale est perpendiculaire à la surface de la pièce à contrôler.
L'appareil mesure le temps aller/retour de l'onde ultrasonore et calcule l'épaisseur de la pièce en fonction de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau.

3) Domaine d'application

Cette méthode s'inscrit dans le cadre d'un diagnostic de corrosion des ouvrages métalliques ou comportant des éléments métalliques.

4) Mode opératoire:

- Etalonnage de l'appareil sur un échantillon de même matériau et d'épaisseur connue.

- Pour les mesures aérienne, utilisation d'un couplant pour le passage des ondes ultrasonores.

Matériels :

- Appareil de mesure
- Palpeurs adaptés
- Cales étalons
- Couplant (mesure en aérien)
- Petite meuleuse

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- Certains appareils nécessite le ponçage de la protection anticorrosion
- Il est à noter qu'il est très difficile d'effectuer cette méthodologie pour mesurer des épaisseur résiduelles de pieux métalliques. En effet, le caractère circulaire des pieux induit une corrosion par cratérisation (de 10 mm à 100 mm en général) qui rend quasi-impossible le placage du palpeur au fond du cratère, à moins de trouver un palpeur « quasi-ponctuel ».

6) Auscultations complémentaires:

Un prélèvement d'eau et des sols situés à l'arrière du rideau de palplanches peut-être réalisées en vue d'une caractérisation de l'agressivité des sols.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

Le compte-rendu des mesures d'épaisseurs résiduelles et de profondeur de carbonatation doit comprendre :

- L'implantation des mesures dans la structures
- Les conditions de mesures et toutes informations relatives à son déroulement (état de surface, préparation,…)
- Le type d'appareil et de palpeur utilisé.
- Photographies si nécessaire
- Il convient de définir ce qu'est une mesure : certains prestataires entendent par « mesure » la moyenne de trois mesures réalisées sur une pastille nettoyée.

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

La connaissance des épaisseurs résiduelles permet de déterminer les pertes d'épaisseurs de l'acier et de conclure sur le risque pour la stabilité de l'ouvrage.

9) Prix

Le prix dépend :

- du nombre de mesures.
- des préparations de surface à réaliser ou non
- de la zone de mesure (plongeurs, échaudage, nacelle…)
- du déplacement du laboratoire au site
- de la vacation de personnel

10) Référence biblio, normatives

NF EN 10160: Contrôle ultrasonore des produits plats en acier d'épaisseur égale ou supérieure à 6 mm (méthode par réflexion)

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'une diagraphie avec une sonde à neutrons

1) Nom de la méthode
Réalisation d'une diagraphie avec une sonde à neutrons.

2) Description : principe de la méthode
La présente méthode a pour objet de connaître la teneur en eau volumique d'un matériau en place, à l'aide d'une sonde introduite dans un forage ou une réservation existants.

En se propageant dans le sol, les neutrons rapides (généralement de type d'Americium - Berylium) émis par la sonde perdent beaucoup de leur énergie en entrant en collision avec des noyaux d'atomes, principalement l'hydrogène. Ils deviennent dans un premier temps des neutrons thermiques, puis sont complètement absorbés.

Les détecteurs de la sonde comptent les neutrons thermiques et leur concentration peut se traduire, en utilisant une courbe d'étalonnage, par une concentration en noyaux d'hydrogène, liée à la teneur en eau du matériau.

3) Domaine d'application
La méthode permet d'apprécier la teneur en eau volumique d'un matériau en place au moyen d'une sonde équipée d'une source à neutrons.

La méthode nécessite la connaissance des normes et dispositions à prendre concernant l'utilisation, le transport, le stockage des sources radioactives, ainsi que la connaissance de la législation et des règlements en vigueur.

4) Mode opératoire:
Généralités :

Le mode opératoire comprend les étapes suivantes :

1- Préparation

Elle consiste tout d'abord à noter le maximum d'informations concernant le forage (lieu, date, opérateurs, repérage du sondage sur un plan…).

Afin de vérifier le bon fonctionnement du matériel, une mesure est effectuée lorsque la sonde est dans son étui de protection.

Il s'agit ensuite de mettre en place, dans le forage, le tube dans lequel sera descendue la sonde à neutrons et de s'assurer de la libre circulation ultérieure de cette dernière.

2- Mise en œuvre de la sonde

Après raccordements et vérifications, la sonde est introduite dans le tube.

Le zéro de la profondeur de la sonde correspond au sommet du tube.

3- Mesures

La mesure se fait soit à sonde immobile, maintenue à la profondeur voulue, soit en remontant la sonde à partir du fond du tube à vitesse sensiblement constante.

Les deux détecteurs de la sonde comptent simultanément le nombre de neutrons, pendant une durée fixée en fonction de la puissance de la source et du volume du matériau à ausculter.

La valeur de la mesure est affectée à la profondeur où se trouve la sonde, à la fin de chaque durée de comptage.

Les intervalles de restitution des mesures simultanées du taux de comptage et de la profondeur de la sonde sont précisés dans le procès verbal.

4- Etalonnage

Le principe d'étalonnage des sondes est donné dans l'annexe A de la Norme XP P 94-123.

Conditions particulières :

La sonde sera protégée des risques d'éboulements en la descendant dans un tube (en polyéthylène ou acier par exemple) ou en tubant le forage lui-même.

Dans le cas d'un forage incliné, la sonde pourra être munie de centreurs.

Matériels :

Tube d'auscultation ou tubage éventuel
Sonde à neutrons (une source de neutrons rapides et des détecteurs de neutrons thermiques, associés à un dispositif de mesure)

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)
- Les mesures dans les sondages doivent être représentatives de la zone à étudier.

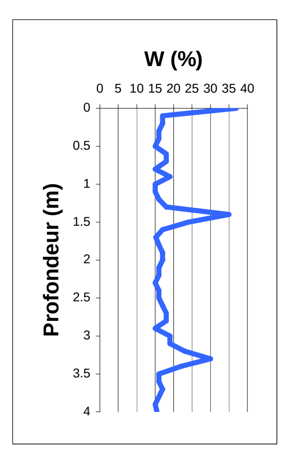
- Les incertitudes de mesures concernent la profondeur de la sonde. Cette incertitude doit être inférieure à la plus grande des deux valeurs suivantes :
  . 1/500 de la distance entre la position de la sonde et le sommet du tube de mesure,
  . 5 cm.
- Le rayon d'investigation de la méthode est de l'ordre de 15 cm.

- La méthode est non destructive, elle peut être répétée au même emplacement.

- Ses résultats sont très influencées par la composition chimique : le fer et le chlore, par exemple, perturbent fortement la mesure.

6) Auscultations complémentaires:
Les mesures à la sonde à neutrons peuvent associées à des diagraphies complémentaires (sonde gamma-gamma…), des carottages suivis d' éventuels essais de laboratoire…

7) Résultats : (type, ordre de grandeur…)



Le procès-verbal comporte, en plus des informations sur la diagraphie, un graphe représentant, en fonction de la profondeur, la valeur de chaque comptage, selon un pas de mesure précisé, et éventuellement la teneur en eau massique W ou volumique W_N.

Fig.1 : Résultats d'une diagraphie avec une sonde à neutrons, montrant deux anomalies, vers 1,4 m et 3,3 de profondeur.

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)
Cette méthode donne des informations sur la porosité et la teneur en eau du sol.
Elle peut être utilisée, par exemple, pour contrôler la conformité de fondations profondes ou de comblements de cavités souterraines.

Le compte-rendu de l'opération comprendra les éléments suivants :

-Un rappel de la commande
-Les plans de situation et d'implantation des sondages
-Eventuellement, les coupes géologiques des forages dans lesquelles ont été réalisées les mesures et comportant :
  ° nature et niveau des différentes couches de terrain traversées,
  ° venues d'eau constatées à l'exécution des forages,
  ° paramètres techniques de forage (mode, outil, tubage),
  ° enregistrements des paramètres de forage.

-Le procès verbal de diagraphie et son interprétation

-Les observations liées aux mesures et au matériel utilisé

9) Prix
Le prix dépend :

- du nombre de mesure et de leur profondeur,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives
Norme XP P 94-123 : Sols : Reconnaissance et Essais – Diagraphie dans les sondages
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – 228 : Applications des sondes de diagraphies nucléaires dans le domaine du contrôle des fondations profondes et des comblements de cavités souterraines

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Détection et localisation des armatures



1) Principe de la méthode

C'est une technique d'investigation, non destructive, qui permet, grâce à un appareil portatif léger de type électromagnétique, de localiser des armatures dans le béton.

Le principe de la mesure repose sur la variation d'un champs électromagnétique émis en présence d'éléments métalliques.

Cette variation est fonction de l'épaisseur du béton et du diamètre des barres.

Cette technique est utilisable tant pour les parties aériennes qu'immergées (fonction des fournisseurs de matériel).

2) Domaine d'application

Pour la plupart des appareils la profondeur d'investigation est limitée à 100 mm environ, ce qui est suffisant pour atteindre la première nappe d'armatures passives.

Pour des profondeurs supérieures, on doit avoir recourt à la technique de détection par radar.

Applications possibles de la technique :

- Vérifier que l'enrobage des armatures correspond à l'enrobage recommandé en fonction de l'exposition et de la durée d'utilisation de l'ouvrage.
- Déterminer la distribution des enrobages nécessaire à l'estimation de la durée de vie résiduelle du béton armé vis à vis de la corrosion des armatures
- Avoir des éléments sur les armatures (diamètre, nombre, positionnement), à défaut de plans d'armatures présents dans le dossier d'ouvrage.
- Localiser des armatures préalablement à d'autres investigations ; carottages, perçages , réalisation de fenêtres, mesures de corrosions …

Remarque: il est recommandé de valider les diamètres et enrobages par la réalisation d'un sondage destructif.

3) Mode opératoire et recommandations

La méthode consiste à passer un appareil de type électromagnétique sur la surface de la pièce en béton armé à contrôler.

Positionnement et nombre de mesures :

Il est recommandé de détecter puis de tracer les aciers dans les deux directions perpendiculairement en indiquant à la craie la position de l'axe des armatures.

A partir de ce tracé des aciers, on établit le maillage des points de mesures, plus ou moins fin suivant la précision recherchée mais il est souhaitable, s'il on recherche à connaître l'enrobage, d'avoir un maillage de l'ordre de 20 cm. Effectivement, lors du coulage d'une partie d'ouvrage, il est possible que les cages d'armatures bougent. L'enrobage peut donc être variable sur une même partie d'ouvrage.

On reporte sur un plan le tracé des aciers de la zone auscultée et le maillage des points de mesures.

Pour certains appareils disposant d'un enregistrement de données et d'un logiciel de traitement pour PC, il est nécessaire d'utiliser une trame quadrillée.

Pour certains types de matériels, qui nécessitent de connaître le diamètre des barres, et si on n'est pas certain de la valeur à prendre en compte, il y a lieu de le vérifier par sondage, en effectuant un carottage pour mesurer l'épaisseur de l'enrobage réelle.

Attention :

Des sources extérieures de champs magnétiques ou des parties métalliques noyées dans le béton peuvent venir perturber les mesures.

Les zones de recouvrements des barres et d'intersection avec des armatures transversales peuvent également fausser la mesure.

4) Résultats attendus

Précisions attendues :

- 5 mm sur la localisation des barres,
- 2 mm sur la mesure de l'enrobage,
- 5 mm sur la mesure de diamètre (ou deux gammes près)

D'après l'ensemble des mesures ponctuelles réalisées on établit deux populations d'enrobages :

- l'une sur armatures horizontales
- l'autre sur armature verticales

Chaque population est caractérisée par sa distribution que l'on considère comme normale (moyenne et écart type).

On examine avec attention les valeurs qui sont inférieures à l'enrobage nécessaire et on les rapproche des autres investigations réalisées (profondeur de carbonatation, profil de pénétration chlorures) pour formuler les conclusions.

5) Rendements

Le rendement dépend du matériel utilisé. L'utilisation de matériel équipé de système d'acquisition augmente considérablement le rendement:
Implantation et reconnaissance du plan de ferraillage: 2 m²/h
Mesure d'enrobage: 10 ml/min

Pour les matériels à lecture directe sans système d'acquisition, les rendements peuvent être divisés par 2.

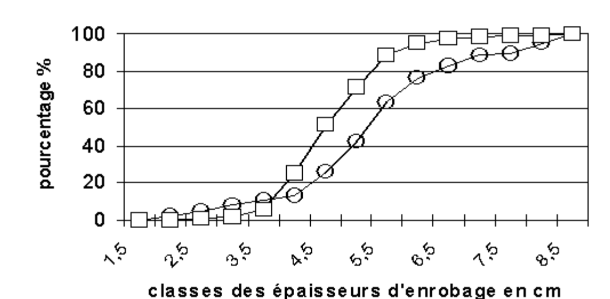
6) Documents de référence

NORMES BS 1881.1204

Rapport de recherche n° 2.43.04.6, 7, 8 du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées « Métrologie sans contact appliquée aux ouvrages d'art »

Guide AFGC

Exemple de distribution des enrobages



FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Prélèvement d'échantillons de béton par carottage



1) Nom de la méthode

Prélèvement d'échantillons de béton par carottage

2) Description: principe de la méthode

La présente méthode a pour objet de préciser les conditions de prélèvement par carottage et de conservation d'échantillons de béton destinés à la réalisation d'essais spécifiques (voir plus loin).

3) Domaine d'application

Cette méthode s'applique aux structures en béton armé ou non. Elle est incontournable pour la réalisation des essais suivants :

- analyses physico-chimiques,
- essais mécaniques,
- mesures de la profondeur de béton carbonaté,
- essais de durabilité vis-à-vis de l'alcali - réaction,
- détermination du coefficient de diffusivité des Cl^- et du CO_2.

4) Mode opératoire:

Généralités :

- Un schéma d'implantation doit être défini avant l'opération.
- Pour faciliter le carottage, les armatures du ferraillage peuvent être localisées à l'aide d'une méthode ad hoc (RADAR, FEROSCAN, PROFOMETER)
- Les carottes sont conditionnées et transportées au laboratoire conformément à la norme NF EN 12390-2.
- Après le carottage, les trous sont examinés et toutes informations susceptibles d'orienter le diagnostic sont notées.
- Le rebouchage des trous après carottage doit être prévu

NB : L'utilisation du carottier est possible en plongée, pour sortir des carottes dans des bétons immergés. Elle n'implique pas de règles particulières, mais demande un savoir faire dans ce domaine.

Conditions particulières :

Selon les essais auxquels sont destinés les carottes, ces dernières doivent vérifier un certain nombre de conditions :

Matériels :

- Carottier
- Carotteuse (groupe électrogène si nécessaire)
- Dispositif d'approvisionnement en eau
- Dispositif de fixation (matériel de perçage, chevilles)
- Dispositif d'extraction des carottes
- Endoscope et appareil photographique
- Pachomètre éventuellement

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- Le carottage ne doit pas affaiblir la structure au point de la mettre en danger
- L'implantation des carottages dépend d'un certain nombre de critères tels que le fonctionnement de la structure, l'homogénéité du béton, la densité et la position du ferraillage, l'exposition du béton (zone émergée soumise aux embruns, immergée, marnante).
- Les prélèvements doivent être représentatifs de la zone à étudier ; les zones saines doivent faire également l'objet de prélèvement pour servir de référence.

6) Auscultations complémentaires:

Le prélèvement d'échantillons de béton peut être associé à des mesures d'enrobage ; dans ce cas il permet d'étalonner la méthode de mesures. L'utilisation d'un endoscope peut être intéressant.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)



Le compte-rendu de l'opération de prélèvement d'échantillons de béton doit comprendre les éléments suivants :

- L'implantation des carottes dans la structures
- Les conditions de carottage et toutes informations relatives à son déroulement (température, hauteur de marée,…)
- La géométrie des carottes (diamètre, hauteur)
- Photographies et description sommaire de chaque carotte et trous

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Le carottage permet principalement d'extraire un échantillons de béton afin de réaliser des essais en laboratoire. L'observation des carottes peut également permettre l'identification d'un défaut de qualité du béton (porosité, cavité) et des armatures passives (enrobage, corrosion).

9) Prix

Le prix dépend :

- du nombre et du linéaire de carottage
- des conditions d'accès (éventuellement location de nacelle, subaquatique)
- de l'amortissement du matériel de carottage
- du déplacement du laboratoire au site
- de la vacation de personnel

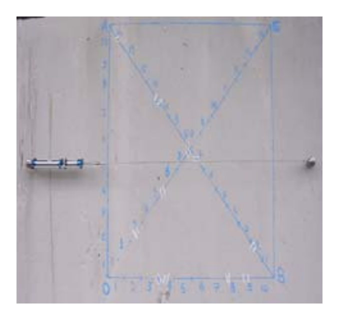
10) Référence biblio, normatives

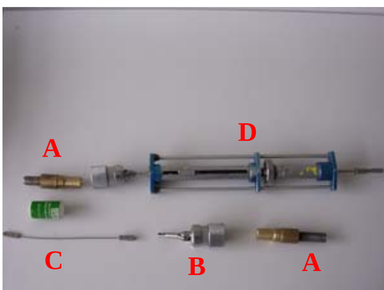
NF EN 12390-2: Essais pour béton durci – Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance

NF EN 12504-1: Essais pour béton dans les structures – Partie 1: Carottes – Prélèvement, examen et essais en compression

Essai concerné	***Conditions particulières pour les prélèvements***
Essai mécanique	• le diamètre (∅) des carottes dépend de la taille (D) des plus gros granulats ∅ ≥ **3D** • la longueur de la carotte doit permettre d'obtenir un échantillon d'élancement si possible égal à 2
Qualification du béton par composition chimique et/ou minéralogique	Avec le carottage à l'eau, le pourtour de la carotte est délavé sur quelques mm d'épaisseur et les sels solubles sont évacués : **le diamètre (∅) des carottes est au minimum égal à 80 mm**
Mesure de profondeur de béton carbonaté	• La longueur des carottes (l) doit être supérieure à l'enrobage des armatures. • Le diamètre (∅) minimum est de 50 mm.
Alcali-réaction	• Le carottage doit être effectué à l'eau, en évitant d'intercepter des fissures ou le ferraillage. • Le diamètre recommandé de la carotte est de 100 ± 10 mm. • Sa longueur est d'environ deux fois le diamètre ou trois fois si l'on prévoit deux niveaux de mesure. • Les carottes sont rincées à l'eau claire, essuyées et enfermées dans des sacs hermétiques.
Calcul du coefficient de diffusion des Cl^- ou/et du CO_2	Le diamètre de la carotte doit être compris entre 100 et 110 mm, son épaisseur minimum étant de 50 mm *L'essai est réalisé sur une galette de 20 mm d'épaisseur.*

FICHE DE METHODE D'INVESTIGATION :
Mesures au distancemètre LPC





1) Nom de la méthode

Mesures au distancemètre orientable à fil d'invar

2) Description : principe de la méthode

La présente méthode a pour principe de mesurer la variation de distance entre deux points ou plusieurs points d'un ouvrage ou de parties d'ouvrage. La chaîne de mesure est constituée des repères scellés (A) dans la structure, du corps d'ancrage(B), d'un fil maître et/ou de ses rallonges (C), du dynamomètre à ressort taré équipé d'un vernier de mesure (D).

3) Domaine d'application

Suivi de structure en maçonnerie, en acier, en béton, en bois.

4) Mode opératoire :

La mise en œuvre de ce système implique la mise en place de repères scellés ou fixés au préalable sur la structure (respecter le temps de séchage des produits de scellement avant la mesure initiale).

1 - Mise en place du distancemètre et de son corps d'ancrage sur la base à mesurer,

2 – Mise en place du fil maître et de ses rallonges (en ordre décroissant du corps d'ancrage vers le dynamomètre),

3 – Tourner la molette de façon à tendre le dispositif et amener les repères de tension du dynamomètre en position centrée.

4 – Relever la mesure sur le vernier du dynamomètre et les composantes des fils,

(nota : A chaque mesure est associé une température prise avec un thermomètre étalonné.)

5 - répéter les mesures trois fois (après chaque mesure, détendre en revenant en arrière d'au moins 10 mm puis retendre le dynamomètre)

6 – Lorsque les trois mesures sont réalisées, détendre l'appareillage, décrocher les fils et faire exécuter au distancemètre et à l'embout d'ancrage une rotation de 180°

7 - raccrocher les fils et refaire 3 mesures de la même façon que précédemment.

Nota : Sur des structures soumises au phénomène des marées, il est conseillé d'effectuer les mesures de suivi selon des marées similaires (hauteur de pleine mer et de basse mer approchantes de la mesure initiale) et de réaliser ces mesures au même niveau de la marée qu'au jour des mesures initiales.

5) Domaine de validité

L'appareillage permet des mesures sur des repères scellés écartés au minimum de 0,65 mètre et au maximum de 40 mètres

La précision des mesures est de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm

6) Auscultations complémentaires

Inclinométrie

Mesures de rotation par nivelle

Piézomètre

Indice de fissuration

7)Résultats :

Le compte-rendu de mesures au distancemètre à fil d'invar doit comprendre :

- La date et l'heure de la mesure et conditions d'intervention
- L'identification de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage et de la base mesurée
- Les conditions météorologiques (température ambiante et éventuellement de la structure)
- Les conditions de la marée (niveau de la PM et la BM, et hauteur d'eau lors de la mesure)
- Les valeurs de la mesure initiale et les valeurs des mesures de suivi antérieurs
- Une représentation schématique de l'implantation des bases de mesures

8) interprétation des résultats

La présente méthode permet de suivre l'évolution de la variation d'écartement, entre 2 ou plusieurs repères scellés, dans le cadre du suivi de la déformation d'une structure ou du suivi de fissures. Associée à un système de mesure inclinométrique, elle permet également de qualifier un déplacement soit en tête de tube, soit en pied de tube inclinométrique (recherche de phénomène de glissement d'une structure).

9) Prix

Le prix de cette prestation se décompose comme suit :

- de la préparation de l'instrumentation (pré-visite d'ouvrage, définition du plan d'instrumentation, commande de matériel pour l'instrumentation)
- de la mise en place de l'instrumentation (perçage, scellement des repères et mesure initiale)
- temps passé par le personnel (2 personnes)
- amortissement du matériel et des étalonnages du matériel (dynamomètre + fils)
- prix de déplacement du laboratoire au site instrumenté,
- temps passé pour le traitement des données et la réalisation d'un compte rendu de mesures.

10) Référence bibliographique

Notice d'utilisation du distancemètre DO 1

Fiche OA ED E 4.1.2

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un essai Lugeon

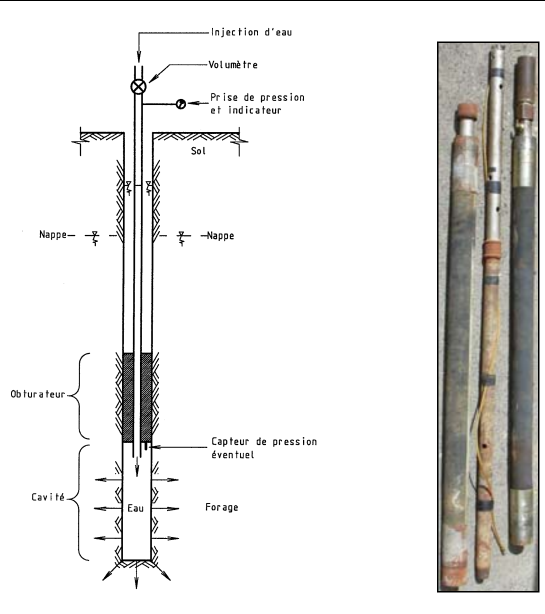


Schéma 1 : Principe de réalisation *Photo 1 : Sonde et obturateurs*

1) Nom de la méthode

Réalisation d'un essai Lugeon

2) Description : principe de la méthode

La présente méthode a pour objet d'évaluer in-situ la possibilité de circulation d'eau dans la roche et à déceler des hétérogénéités ou des fissurations.

Il consiste à injecter de l'eau sous pression dans une cavité constituée d'une portion de forage de dimensions connues, et à mesurer le débit d'injection pour différents paliers de pression, pendant un temps donné.

3) Domaine d'application

L'essai Lugeon s'applique au rocher et aux sols cohérents de résistance mécanique compatible avec la pression d'eau imposée pendant l'essai. Cet essais s'applique aussi aux ouvrages en maçonnerie ou en béton.

4) Mode opératoire :

Généralités :

- L'essai est généralement réalisé dans un forage à l'avancement.
- Les points de sondage sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (opérateur, date, numéro de dossier, cote de l'essai, niveau piézométrique….) sont notées.
- L'essai d'eau Lugeon consiste à :
    - o réaliser à l'intérieur du sol, par extraction, une cavité à la base d'un forage, puis à relier cette cavité à la surface du sol par un tube d'injection. La cavité est constituée d'une portion de forage comprise entre le fond et d'un obturateur qui la limite en partie haute,
    - o produire et maintenir constante une charge hydraulique à l'intérieur de la cavité en injectant de l'eau sous des paliers de pression croissante puis décroissante (0,2 MPa – 0,4 MPa - 0,6 MPa – 0,8 MPa – 1,0 MPa puis 0,7 MPa – 0,5 MPa – 0,3 MPA et 0,1 MPa)
    - o mesurer le volume injecté dans la cavité toutes les minutes.

Matériels :

- Matériel de forage
- Système d'obturation (Packer)
- Dispositif d'injection d'eau
- Système de mesure du volume d'eau

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- Les essais réalisés doivent être représentatifs de la zone à étudier.
- L'essai Lugeon ne s'applique pas aux sols meubles de faible cohésion.
- Dans le cas de massifs déjà fragilisés (maçonnerie…), la pression d'injection sera à adapter pendant l'essai afin de ne pas les endommager davantage.

6) Auscultations complémentaires :

Les résultats de l'essai Lugeon sont à corréler avec les coupes géologiques des éventuels sondages carottés dans lesquels ils ont été effectués et en particulier avec le RQD, qui renseignera sur l'origine des variations de perméabilités (fractures ouvertes, vides…).

7) Résultats : (type, ordre de grandeur,…)

- Ils consistent à représenter le diagramme du débit Q en fonction de la pression effective P_e. Différentes allures de courbes sont obtenues suivant que l'écoulement est turbulent ou laminaire, que l'on observe un colmatage ou un débourrage des fissures.
- La perméabilité effective en m/s est donnée par la relation :

$$k = \frac{Q}{C.P_e}$$

avec C le coefficient de forme de la cavité, P_e la pression effective (en MPa) et Q le débit d'écoulement (en m^3/s)

- Les résultats sont fournis en *lugeons* : une unité *lugeon* représente le nombre de litres d'eau absorbé par minute et par mètre de forage, sous une pression de 1 Mpa. Un lugeon correspond grossièrement à 10^{-7} m/s.

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Dans les diagnostics d'ouvrages en maçonnerie, des essais Lugeon sont réalisés pour déterminer la perméabilité de la maçonnerie et en déduire des renseignements sur son état :

Perméabilité de la maçonnerie (m/s)	Qualité de la maçonnerie
$10^{-4} \le k$	Très mauvaise
$10^{-6} \le k \le 10^{-4}$	Mauvaise à moyenne
$10^{-8} \le k \le 10^{-6}$	Bonne
$k \le 10^{-8}$	Très bonne

Tableau 1 : Perméabilité comme indice de la qualité de la maçonnerie

9) Prix

Le prix dépend :

- du nombre d'essais Lugeon et de leur profondeur
- du nombre, du linéaire et du type de sondage à réaliser
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site
- de l'amortissement du matériel de forage
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire

10) Référence biblio, normatives

NF P 94-131 : Sols : Reconnaissance et Essais – Essai d'eau Lugeon
NF P 94-500 : Missions géotechniques – Classifications et spécifications
« Les essais d'eau en géotechnique – Cycle de formation » Gilles BERTAINA

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation de mesures piézométriques dans un tube ouvert

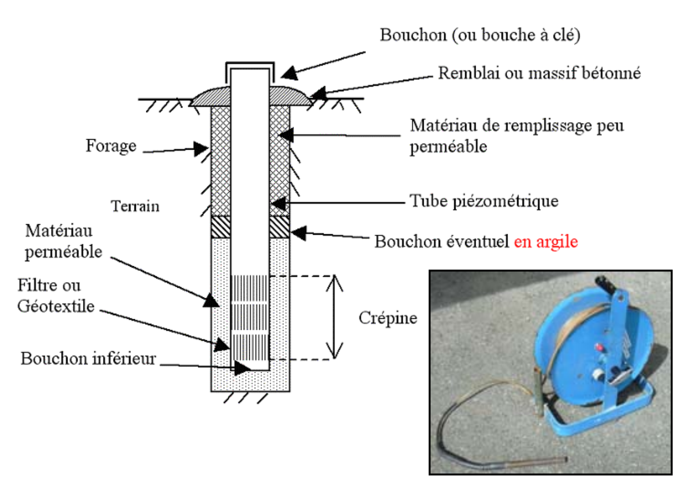


Photo 1 : Détecteur de niveau d'eau

1) Nom de la méthode

Réalisation de mesures piézométriques effectuées dans un tube ouvert.

2) Description : principe de la méthode

La présente méthode a pour objet de déterminer la charge hydraulique ou la pression interstitielle en un point donné du massif de sol ou de roche fissurée et, par extension, de mesurer le niveau d'eau dans le sol.

3) Domaine d'application

Il s'agit ici de déterminer le niveau d'eau dans un tube vertical mis à l'atmosphère ambiant et placé dans un terrain dont la perméabilité globale est supérieure ou égale à $1x10^{-7}$ m/s.

4) Mode opératoire :

Généralités :

- Le mode opératoire consiste à placer verticalement dans le terrain un tube crépiné dont l'extrémité M est placée au sein d'une zone saturée et à attendre que l'eau se stabilise dans le tube à son point d'équilibre.
- Le tube piézométrique est mis en place dans une cavité artificielle réalisée
  - soit par forage, avec tubage dans le cas où la stabilité des terrains n'est pas assurée,
  - soit par passage préalable d'un mandrin battu, foncé ou vibro-foncé, uniquement dans le cas de terrains graveleux boulants ou sous la nappe.
- On mesure alors
  - soit directement la distance entre la surface du sol et le niveau d'eau dans le tube, à l'aide d'un détecteur de niveau d'eau,
  - soit la pression hydrostatique au point M dans le liquide de masse volumique connue, à l'aide d'un capteur de pression.
- Un remblai ou un massif de béton est mis en place autour de la tête du tube muni de son couvercle (ou bouche à clé).
- La présence du tube piézométrique sera signalée et les piézomètres seront repérés sur un plan de situation.

Matériels :

- Matériel de forage
- Tubes rectilignes en général de diamètre intérieur supérieur à 20 mm, munis de crépine
- Matériau perméable (massif de gravier …)
- Bouchon placé à la partie inférieure du tube piézométrique
- Couvercle amovible de protection de la partie supérieure du tube
- Détecteur de niveau d'eau ou capteur de pression

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- Un délai de repos d'au moins un jour pour les sols perméables et d'au moins une semaine pour les sols peu perméables (perméabilité estimée inférieure à $1x10^{-5}$ m/s) est à observer après la mise en place du tube piézométrique.

6) Auscultations complémentaires:

La périodicité des relevés piézométriques est déterminée en fonction de l'objectif de l'étude. En fonction de ce dernier, les relevés piézométriques pourront s'accompagner de sondage de reconnaissance supplémentaires, d'analyses d'eau, d'une étude hydrologique complète…

Dans le cas de piézomètres soumis à la marée, un suivi sur un cycle (haute et basse mer) et selon différents cas de marées (vive eau, morte eau…) permet d'obtenir le déphasage entre la nappe phréatique du quai et le niveau marin

La pose de piézomètre de diamètre moyen (>50 mm intérieur) permet de récupérer des echantillons d'eau pour analyses chimiques (pollution, agressivité...)

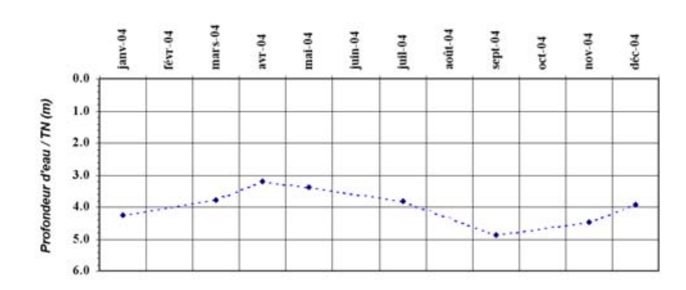
7) Résultats : (type, ordre de grandeur,…)

Le procès verbal comporte les informations suivantes :

- un plan de situation et d'implantation des piézomètres
- les informations concernant le forage piézométrique (coupe de terrain, outil, tubage…)
- la date de pose du tube et l'opérateur
- les profondeurs du piézomètre et de la partie crépinée
- le diamètre du tube et le type de protection en tête
- les relevés piézométriques (niveau d'eau / TN, date, heure, cote altimétrique du niveau d'eau)
- les différentes autres observations

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Les relevés piézométriques sont rendus avec le procès verbal sous forme d'un graphique représentant les niveaux d'eau (ou les pressions interstitielles) en fonction des dates de relevés :



Ils s'accompagneront d'une interprétation répondant à l'objectif de l'étude :
Le niveau de la nappe sera nécessaire dans la préconisation des drainages et assainissements éventuels dans une étude de terrassement, par exemple. Dans une étude de fondations, on pourra recommander le pompage ou la réalisation d'un batardeau pour exécuter des semelles situées sous le niveau piézométrique...

9) Prix

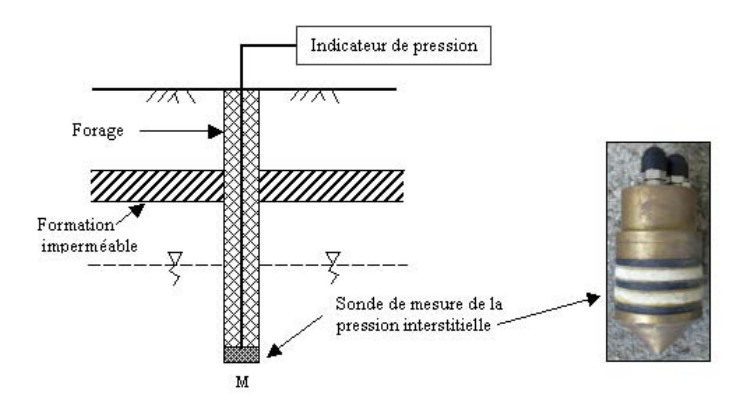
Le prix dépend :

- du nombre et du linéaire de forages à réaliser,
- du nombre et du linéaire et du diamètre de tubes à poser,
- des équipements (tubage, bouchons, matériaux…),
- de la périodicité des relevés prévus dans le suivi piézométrique,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de forage,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-157-1 : Sols : Reconnaissance et Essais – Mesures piézométriques - Partie 1 : Tube ouvert

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation de mesures piézométriques au moyen de sondes de mesure de pression interstitielle



1) Nom de la méthode

Réalisation de mesures piézométriques effectuées au moyen de sondes de mesure de pression interstitielle.

2) Description : principe de la méthode

La présente méthode a pour objet de connaître la pression interstitielle du terrain, en mesurant la pression du fluide dans une sonde au moyen d'un conditionneur de pression soit placé en surface, soit solidaire de la sonde.

3) Domaine d'application

Il s'agit de déterminer la pression interstitielle régnant dans les pores d'un terrain saturé ou d'une roche fissurée et saturée.

4) Mode opératoire :

Généralités :

- Il existe plusieurs types de sondes :
  - o Sonde hydraulique
  - o Sonde à diaphragme déformable
- Après leur préparation, comme décrit dans la norme NF P 94-157-2, les sondes de mesures de pression interstitielle sont mises en place dans le terrain
  - o soit directement par fonçage, dans les terrains fins, mous et peu résistants,
  - o soit par forage préalable.
- On mesure alors
  - o soit directement la distance entre la surface du sol et le niveau d'eau dans le tube, à l'aide d'un détecteur de niveau d'eau,
  - o soit la pression hydrostatique au point M dans le liquide de masse volumique connue, à l'aide d'un capteur de pression.
- Le matériel placé à la surface du sol (tubulures, câbles électriques, poste de mesure) doivent être protégé contre les effets thermiques et l'ensoleillement direct, contre les phénomènes électriques (foudre…), contre les ruptures ou chocs…
- La présence des cellules sera signalée et elles seront repérées sur un plan de situation.

Matériels :

- Sonde
- Matériel de forage
- Matériel de mesurage (avec stockage éventuel des données en surface)

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

- Un délai de repos de un à plusieurs jours est à observer après la mise en place de la sonde.

- L'incertitude concerne la cote altimétrique de la sonde. Elle doit être au plus la plus grande des deux valeurs suivantes : 5 cm ou 1% de la profondeur mesurée.

- Les pressions mesurées sont données par rapport à la pression atmosphérique le jour de mesure. Elles doivent être corrigées si nécessaire de la variation de la pression atmosphérique entre les mesures.

6) Auscultations complémentaires:

La périodicité des relevés piézométriques est déterminée en fonction de l'objectif de l'étude. En fonction de ce dernier, les relevés piézométriques pourront s'accompagner de sondages de reconnaissance supplémentaires, d'analyses d'eau, d'une étude hydrologique complète, de mise en place de tassomètres…

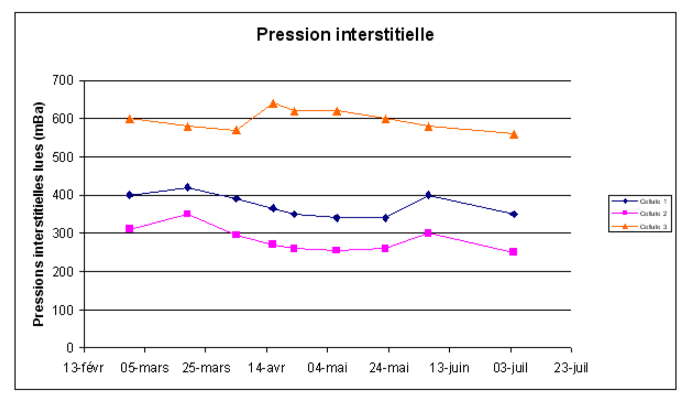
7) Résultats : (type, ordre de grandeur,…)

Le procès verbal comporte les informations suivantes :

- un plan de situation et d'implantation des cellules de mesure de pression interstitielle
- les informations concernant le forage éventuel (coupe de terrain, outil, tubage…) et le type de cellule de mesure utilisé
- la date et profondeurs de pose des cellules et nom de l'opérateur
- la date, l'heure et la valeur de la pression interstitielle mesurée à chaque relevé
- les différentes autres observations

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

Les relevés piézométriques sont rendus avec le procès verbal sous forme d'un graphique représentant les pressions interstitielles en fonction des dates de relevés :



La mesure des pressions interstitielles peut avoir plusieurs objectifs :

- connaître le niveau piézométrique d'une nappe en équilibre ou modifiée par l'exécution de travaux, par un pompage ou un rabattement de nappe,
- suivre l'évolution dans le temps de la pression interstitielle dans le terrain afin d'analyser sa stabilité ou étudier la consolidation du sol sous un ouvrage, etc.

9) Prix

Le prix dépend :

- du nombre et du linéaire de forages à réaliser,
- du nombre et du type de cellules à poser,
- de la périodicité des relevés prévus dans le suivi piézométrique,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de forage,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-157-2 : Sols : Reconnaissance et Essais – Mesures piézométriques - Partie 2 : Sonde de mesure de pression interstitielle

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un essai de pénétration dynamique type A



Pénétromètre dynamique

1) Nom de la méthode

Réalisation d'un essai de pénétration dynamique type A .

2) Description : principe de la méthode

Cette méthode consiste à enfoncer verticalement dans le sol, par battage et tout en injectant une boue de forage, un train de tiges muni en partie inférieure d'une pointe débordante et à mesurer le nombre de coups pour faire pénétrer la pointe dans le sol d'une hauteur de 10 cm. Le sol est alors caractérisé par sa résistance dynamique.

3) Domaine d'application

L'essai de pénétration dynamique de type A s'applique à tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 60 mm.

4) Mode opératoire:

Généralités :

- Les points de sondage sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (nom du sondage pénétrométrique, opérateur, date, numéro de dossier, masse du mouton utilisé, hauteur de chute du mouton…) sont notées.
- Les étalonnages ou vérifications des différents constituants du pénétromètre et du matériel de mesure doivent être réalisés périodiquement.
- Les vérifications à réaliser avant, pendant et à la fin de l'essai sont décrites dans le paragraphe 6.1 de la norme NF P94-114.
- L'essai consiste à enfoncer verticalement dans le sol, par battage continu (à raison de 15 à 30 chutes du mouton par minute), un train de tiges muni d'une pointe, avec injection de boue entre le train de tiges et le sol.
- Le nombre de coups de mouton nécessaire pour enfoncer la pointe de 10 cm, N_{d10}, est noté en fonction de la longueur totale des tiges introduites dans le sol.
- Le refus est atteint si
  - Soit l'enfoncement sous 30 coups de mouton est inférieur ou égal à 10 cm avec la masse de 128 kg,
  - Soit le rebond du mouton est supérieur à 5 cm.

Matériels :

- Pénétromètre dynamique de type A.

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

L'essai de pénétration dynamique de type A s'applique à tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 60 mm.

Cet essai est limité à une profondeur de 30 m.

Parmi les contrôles à effectuer, il faut vérifier en autres que les tiges et la pointe sont enfoncées verticalement : l'inclinaison maximale tolérée est de 2% par rapport à la verticale pendant le battage.

6) Auscultations complémentaires:

Les sondages pénétrométriques peuvent être complétés par des sondages de reconnaissance destructifs ou carottés et par des sondages pressiométriques qui permettront d'obtenir une coupe géologique et des caractéristiques supplémentaires des terrains à étudier.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

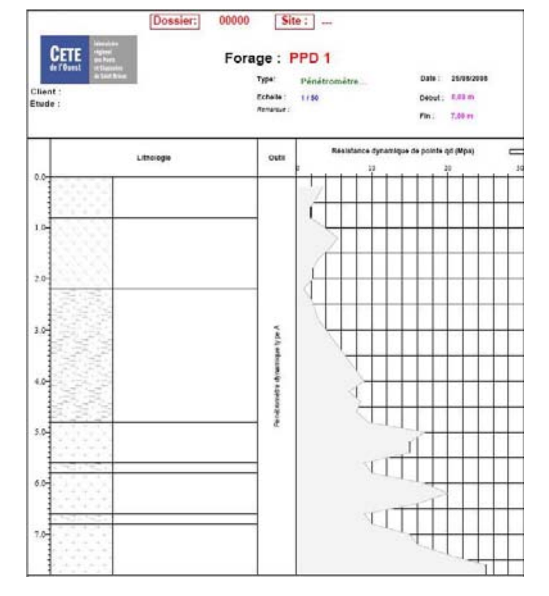
Les résultats de l'essai pénétrométrique présentent, en plus des conditions et caractéristiques de l'essai, le nombre de coups de mouton pour un enfoncement de 10 cm, en fonction de la profondeur.

La résistance dynamique pourra être ensuite être calculée par la formule :

$$q_d = \frac{m \times g \times H}{A \times e} \times \frac{m}{m + m'}$$

avec q_d la résistance dynamique en pascals,
m la masse du mouton en kilogrammes,
g l'accélération de la pesanteur en mètres par seconde carrée,
H la hauteur de chute libre du mouton en mètres,
A l'aire de la section droite de la pointe en mètres carrés,
e l'enfoncement par coups en mètres,
m' la masse cumulée, exprimée en kilogrammes, de l'enclume et de la tige-guide, si celle-ci est solidaire de l'enclume, des tiges, du porte-pointe, de la pointe (masses frappées).

La résistance dynamique sera représentée dans le procès verbal sous forme d'un graphique en fonction de la profondeur :



8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

A partir des paramètres mesurés, l'essai de pénétration dynamique de type A permet d'apprécier :

- la succession des différentes couches de terrain,
- l'homogénéité d'une couche ou la présence d'anomalies,
- la position d'une couche résistante dont l'existence est déjà connue.

Les résultats donnent également un ordre de grandeur des capacités portantes du terrain .

9) Prix

Le prix dépend :

- du nombre d'essais de pénétration dynamique,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de sondage,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-114 : Sols : Reconnaissance et Essais – Essai de pénétration dynamique type A

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Réalisation d'un sondage au pénétromètre dynamique type B




Photo 1 : Pénétromètre dynamique de type B



Photo 2 : Mouton et train de tiges

1) Nom de la méthode

Réalisation d'un sondage au pénétromètre dynamique type B .

2) Description : principe de la méthode

Cette méthode consiste à enfoncer verticalement dans le sol, par battage, un train de tiges muni en partie inférieure d'une pointe débordante, à mesurer le nombre de coups pour faire pénétrer la pointe dans le sol d'une hauteur de 20 cm et vérifier l'importance des efforts parasites éventuels sur le train de tiges.

3) Domaine d'application

Le sondage au pénétromètre dynamique de type B s'applique à tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments est inférieure à 60 mm.

4) Mode opératoire:

Généralités :

- Les points de sondage sont repérés sur un plan de situation et toutes les informations identifiant l'essai (nom du sondage pénétrométrique, opérateur, date, numéro de dossier, masse du mouton utilisé, hauteur de chute du mouton…) sont notées.
- Les étalonnages ou vérifications des différents constituants du pénétromètre et du matériel de mesure doivent être réalisés périodiquement.
- Les vérifications à réaliser avant, pendant et à la fin de l'essai sont décrites dans le paragraphe 6.1 de la norme NF P94-115.
- L'essai consiste à enfoncer verticalement dans le sol, par battage continu (à raison de 15 à 30 chutes du mouton par minute), un train de tiges muni d'une pointe.
- Les efforts parasites sur le train de tiges sont mesurés en faisant tourner le train de tiges sur lui-même (à chaque ajout de tige et au moins tous les mètres) à l'aide d'une clé dynamométrique. Lorsque le couple mesuré est inférieur à 100 N.m, les efforts parasites sont négligeables.
- Le nombre de coups de mouton nécessaires pour enfoncer la pointe de 20 cm, N_{d20}, en fonction de la longueur totale des tiges introduites dans le sol, ainsi que le couple mesuré sont notés.
- Le refus est atteint si
    - o Soit l'enfoncement sous 100 coups de mouton est inférieur ou égal à 20 cm,
    - o Soit l'enfoncement sous 50 coups de mouton est inférieur ou égal à 10 cm,
    - o Soit le rebond du mouton est supérieur à 5 cm,
    - o La mesure du couple effectué à la clé dynamométrique dépasse 200 N.m.

Matériels :

- Pénétromètre dynamique de type B.

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

Le sondage au pénétromètre dynamique de type B s'applique à tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments est inférieure à 60 mm.

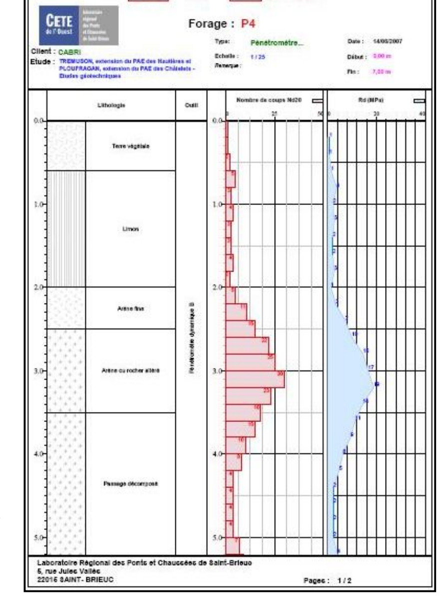
Il est limité à une profondeur de 15 m, parfois moins si le frottement latéral se développe sur le train de tiges.
Parmi les contrôles à effectuer, il faut vérifier en autres que les tiges et la pointe sont enfoncées verticalement : l'inclinaison maximale tolérée est de 2% par rapport à la verticale pendant le battage.

6) Auscultations complémentaires:

Les sondages pénétrométriques peuvent être complétés par des sondages de reconnaissance à ciel ouvert, destructifs ou carottés et par des sondages pressiométriques qui permettront d'obtenir une coupe géologique et des caractéristiques supplémentaires des terrains à étudier.

7) Résultats: (type, ordre de grandeur,…)

Les résultats du sondage au pénétromètre dynamique de type B présentent, en plus des conditions et caractéristiques de l'essai, le nombre de coups de mouton pour un enfoncement de 20 cm, ainsi que les valeurs de couple mesurées, en fonction de la profondeur.



Il est également possible de calculer une résistance de pointe R_d à partir de la formule des Hollandais :

$$R_d = \frac{m \times g \times H}{A \times e} \times \frac{m}{m + m'}$$

avec

R_d la résistance dynamique en pascals,

m la masse du mouton en kilogrammes,

g l'accélération de la pesanteur en mètres par seconde carrée,

H la hauteur de chute libre du mouton en mètres,

A l'aire de la section droite de la pointe en mètres carrés,

e l'enfoncement par coups en mètres,

m' la masse cumulée, exprimée en kilogrammes, de l'enclume et de la tige-guide, si celle-ci est solidaire de l'enclume, des tiges, du porte-pointe, de la pointe (masses frappées).

Dans le cas ou la nature des matériaux en place est connue, la lithologie et le niveau des couches au droit du sondage peut être déduite des caractéristiques pénétrométriques obtenues.

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)

A partir des paramètres mesurés, le sondage au pénétromètre dynamique permet d'apprécier :

- la succession des différentes couches de terrain,
- l'homogénéité d'une couche ou la présence d'anomalies,
- la position d'une couche résistante dont l'existence est déjà connue.

Les résultats peuvent également orienter le choix des fondations.

9) Prix

Le prix dépend :

- du nombre et du linéaire de sondage pénétrométrique de type B,
- des conditions d'accès et du déplacement du laboratoire au site,
- de l'amortissement du matériel de sondage,
- de la vacation de personnel sur site et en laboratoire.

10) Référence biblio, normatives

Norme NF P 94-115 : Sols : Reconnaissance et Essais – Sondage au pénétromètre dynamique type B

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION :
Prélèvement d'échantillons par sondage carotté



Photo 1 : couronnes

1) Nom de la méthode
Prélèvement par sondage carotté

2) Description : principe de la méthode
La présente méthode a pour objet de préciser les conditions de prélèvement en place par carottage d'échantillons de sols et de roches.

3) Domaine d'application
Cette méthode s'applique aux prélèvements effectués dans :

- Tous les types de sols naturels,
- Les remblais, les matériaux traités, les dépôts mis en place par l'homme.

4) Mode opératoire:
Généralités :

- Les paramètres requis pour l'étude et les éventuels essais envisagés sur les échantillons détermineront les techniques et outils de prélèvement
- Les caractéristiques géotechniques mesurables sur les échantillons sont définies par 5 classes de prélèvement
- La nature des terrains et les niveaux ou circulations d'eau doivent être estimés au préalable, à partir de la carte géologique et/ou des reconnaissances déjà réalisées, afin d'adapter ces techniques de prélèvement
- Des déclaration de travaux et recherches de réseaux doivent précéder chacune des interventions, de même qu'un état des lieux en début et fin de chantier, afin de noter d'éventuels dégâts causés par l'unité de sondage
- Un schéma précis d'implantation des forages et des lieux de prélèvement doit être défini avant l'opération.
- Lors du carottage, le maximum d'informations est noté dans le procès-verbal de prélèvement.
- Le rebouchage des trous après carottage doit être prévu.
- L'étiquetage, le conditionnement et le transport des échantillons prélevés font également l'objet de précautions particulières.

Selon la nature et l'état du matériau en place, les paramètres requis pour l'étude et les types d'essais envisagés, différentes techniques de prélèvement existent :

- Forage par poinçonnement, réalisé sans rotation de l'outil
  - Percussion ou battage
  - Fonçage à vitesse constante
- Forage par rotation
  - Avec injection d'un fluide de forage
  - Sans injection d'un fluide de forage

Et divers types d'outils sont associés à chacune de ces techniques (couronnes carbure de tungstène, couronne diamant pour les roches les plus dures...).

L'annexe C de la norme XP P 94-202 contient des éléments pour le choix de la technique de prélèvement, suivant le matériau à étudier et la classe de prélèvement requise.

Matériels :

- Matériel de forage
- Carottier
- Dispositif d'approvisionnement en eau
- Matériel de conditionnement (caisses à carottes …)

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)
- Les prélèvements doivent être représentatifs de la zone à étudier : l'implantation des carottages dépend d'un certain nombre de critères tels que la nature et l'état des matériaux, leur homogénéité.
- Les techniques de prélèvements sont liés à la nature et l'état du matériau en place, les paramètres requis pour l'étude et les types d'essais envisagés.

6) Auscultations complémentaires :
Le prélèvement d'échantillons par carottage peut être associé à des sondages destructifs de reconnaissance, moins coûteux, pour couvrir la zone à étudier, dans le cas d'une géologie homogène.

7) Résultats : (type, ordre de grandeur,…)
Suivant la nature et l'état des matériaux prélevés, le conditionnement des échantillons se fera dans des caisses à carottes, des tubes PVC…

Ci-dessous, quelques exemples de prélèvements :



Photo 1 : Carottes de gneiss prélevées au carottier Ø 101 mm



Photo 2 : Matériaux prélevés au carottier battu Ø 63 mm

Le compte-rendu de l'opération de prélèvement d'échantillons par carottage doit comprendre les éléments suivants :

- Les plans de situation et d'implantation des sondages
- Les coupes de sondages comportant :
  ° nature et niveau des différentes couches de terrain traversées,
  ° venues d'eau constatées à l'exécution des forages,
  ° paramètres techniques de forage (mode, outil, tubage),
  ° pourcentage de carottage,
  ° RQD,
  ° profondeurs et nature des essais envisagés sur les échantillons,
  °enregistrements des paramètres de forage (Vitesse Instantanée d'Avancement, Couple de Rotation, Pression sur l'Outil).
- Photographies des carottes

8) Interprétation des résultats (que faire avec ces données)
L'étude des carottes permet l'élaboration d'une coupe de terrain détaillée.
Dans le cas des massifs rocheux, une estimation de la fracturation est réalisée par le calcul du Rock Quality Design (RQD =somme des longueurs des carottes supérieures à 10 cm divisée par la longueur de la passe)
Enfin, les échantillons de sols ou de roches prélevés sont généralement destinés à la réalisation d'essais en laboratoire.

9) Prix
Le prix dépend :

- du déplacement du laboratoire au site
- des conditions d'accès au chantier de sondage
- des techniques et outils de prélèvement utilisés (tubage, fluide de forage…)
- du nombre et du linéaire de carottages
- de l'amortissement du matériel de carottage
- de la vacation de personnel

10) Référence biblio, normatives
XP P 94-202 : Sols : Reconnaissance et essais Prélèvement des sols et des roches – Méthodologie et procédures

FICHE DE MÉTHODE D'INVESTIGATION
Le radar géologique



Auscultation de digue par radar géologique

1) Nom de la méthode

Radar géologique

2) Description: principe de la méthode

Le Radar Géologique utilise la propagation et les réflexions des ondes électromagnétiques afin d'obtenir une image en continu des structures auscultées.

L'unité de mesure émet des impulsions électromagnétiques brèves.
Ces impulsions, transmises à la structure à ausculter par l'intermédiaire d'une antenne, se réfléchissent partiellement sur les interfaces entre des milieux présentant des contrastes de constantes diélectriques.

Lorsque l'atténuation par le matériau n'est pas trop forte, l'onde réfléchie peut être détectée à la surface par une antenne. Ainsi, à chaque position du radar impulsionnel correspond un signal constitué d'une succession d'échos d'amplitudes variables en fonction du temps.

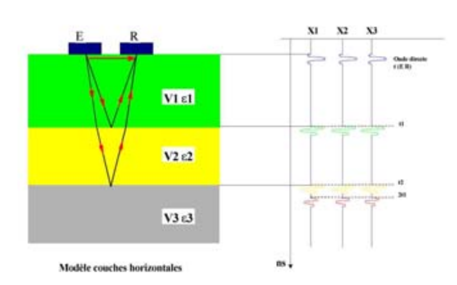
La juxtaposition de signaux obtenus lors du déplacement du radar permet de réaliser une représentation (distance, amplitude, temps de propagation) donnant des informations sur les interfaces entre des couches de matériaux de nature différente ou sur des hétérogénéités éventuelles.

3) Domaines d'application

Cette méthode d'investigation s'inscrit dans les domaines suivants :
- détection d'armatures et de précontrainte dans les ouvrages en béton armé et précontraint
- détection d'hétérogénéités
  - dans les structures en béton
  - dans les digues en maçonnerie
  - dans les sols en arrière des murs de soutènement
  - dans les remblais en arrière de quais
- localisation de vides sous parement bétonné ou maçonné.

4) Mode opératoire

- ***Choix de l'antenne*** : Les fréquences utilisées vont de quelques dizaines de MHz à quelques GHz. Le choix de l'antenne dépend des objectifs de l'étude (profondeur d'investigation, résolution):
  - Structures en béton : 1,5 GHz, 900 MHz
  - Structures en maçonnerie : 900, 400 MHz
  - Sol, remblai, digue : 900, 400, 200 MHz
- ***Réglage*** de la Centrale d'acquisition : pas de mesure, échantillonnage, temps d'écoute,…
- ***Implantation des profils*** : repérage précis des profils de mesure
- ***Réalisation des mesures*** : l'antenne est tractée sur la surface à ausculter (manuellement ou à l'aide d'un véhicule)
- ***Enregistrement des mesures*** et remplissage du carnet de terrain
- Transfert de données et ***traitement***



Rmq *: Selon la configuration de la structure à ausculter, il peut être nécessaire d'utiliser des moyens d'accès spécifiques : nacelle, passerelle négative, bateau…*

5) Domaine de validité (sensibilité, précision, contre-indication)

Les **profondeurs auscultées** par le radar géologique varient de quelques décimètres à quelques mètres et dépendent de 3 facteurs :
- ***la conductivité du matériau*** qui est la principale cause de l'absorption de l'onde radar par celui-ci.
- ***la fréquence de l'onde radar utilisée***. Plus la fréquence émise est basse, plus la profondeur d'investigation est importante. La résolution qui intervient sur la précision de la coupe temps varie également en fonction de celle-ci, cette précision étant d'autant meilleure que la fréquence est haute.
- ***la dynamique du radar*** qui est exprimée par le rapport entre la puissance du signal émis et la puissance du plus petit signal détecté.

Limites de la méthode
Les limites d'utilisation de la méthode sont essentiellement dues à l'absorption de l'onde par les matériaux ou à la présence d'un réflecteur :
- béton frais
- présence d'eau, d'argile
- densité d'aciers importante

6) Auscultations complémentaires

La méthode radar est une méthode non-destructive; l'étalonnage par des moyens de reconnaissance ponctuels tels que carottage ou sondage est souvent nécessaire pour valider les anomalies détectées ou pour déterminer la profondeur des objets ou l'enrobage des aciers.

7) Résultats (type, ordre de grandeur,…)

Les résultats sont présentés sous forme de « coupe-temps » ou « profil radar », qui schématiquement représente l'image des interfaces et hétérogénéités présentes dans la tranche de terrain auscultée.

Du fait de l'ouverture du faisceau d'émission des antennes (90° environ), la signature sur la « coupe-temps » d'hétérogénéités très localisées (petites cavités, aciers, etc…) est représentée par une hyperbole. En effet, une partie de l'énergie émise latéralement par l'antenne est réfléchie et détectée avant et après le passage à la verticale de l'objet.

L'échelle verticale de la coupe-temps est graduée en temps de trajet Aller et Retour, exprimée en nanosecondes (ns). Pour une estimation approchée de la profondeur des interfaces ou des anomalies, on pourra utiliser la relation reliant TT (temps de trajet A et R par mètre) à la constante diélectrique du matériau (ε_r).

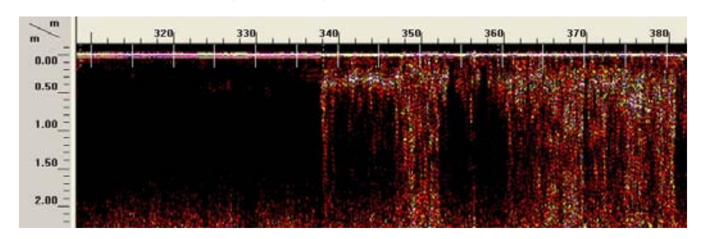
soit $\mathbf{TT = 6.6 \sqrt{\varepsilon_r}}$

Les résultats sont présentés dans un rapport qui reprend :
- la localisation des profils radar réalisés
- les images radar
- un tableau ou une cartographie indiquant la position des éléments détectés

Lorsque la mesure ne nécessite pas de traitement particulier, les éléments détectés peuvent être directement matérialisés sur l'ouvrage à l'aide de craie, peinture, clous…(implantation d'aciers par exemple).

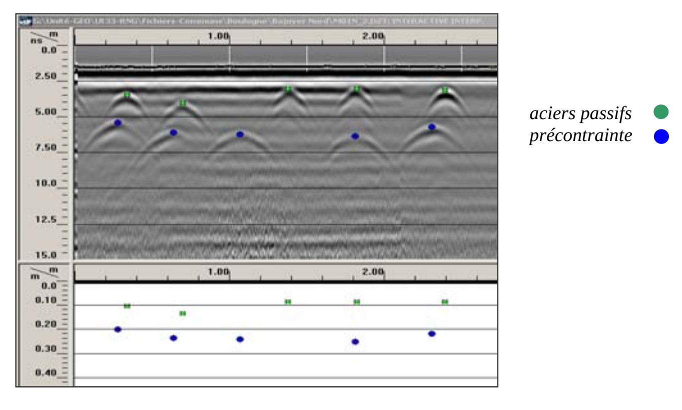
8) Interprétation des résultats

8.1) détection d'hétérogénéités (digues…)



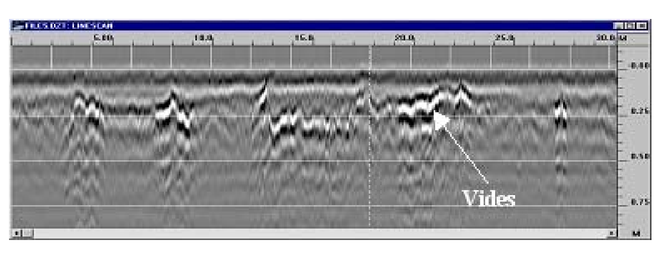
Oléron (digue en maçonnerie de la Perrotine)
La zone de désordres (dislocation de la maçonnerie, départ de fines), est identifiée par des échos multiples provenant des réflexions sur les vides créés au niveau des joints.

8.2) détection d'armatures et de précontrainte dans les ouvrages



Boulogne sur Mer (bajoyer de l'Ecluse Loubet)
La profondeur de détection varie légèrement en fonction des bétons. Elle peut atteindre 40 cm pour une antenne de fréquence 1,5 GHz.

8.3) localisation de vides sous parement bétonné



Honfleur (Berges de la Seine) : détection de vides sous parement béton
Les zones de vides sont identifiées par des réflexions de forte amplitude et des signaux à polarité inversée.

8) Prix :

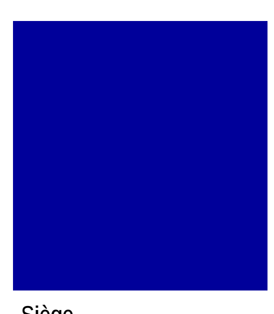
Le prix dépend :

- du nombre de mesures à réaliser (fonction de la surface de la zone à ausculter et de la précision recherchée) et du niveau d'interprétation requis
- des moyens d'accès pour réaliser les mesures
- du déplacement du laboratoire au site

9) Référence biblio, normatives

Géophysique appliquée - Code de bonne pratique
Techniques radar appliquées au génie civil – Xavier DEROBERT – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – 2003
Méthode d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton – Association Française de génie civil – Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées – 2005

Couverture crédit photo(s)	Photo 1
	Photo 2
	Photo 3
	Photo 4
Conception graphique	E.R.A. Saint-Brieuc
Mise en page	Denis COUSIN/CETMEF/DPMVN/BT
Impression	Gérard CORPITA et Fernande GUTH/BMG/CETMEF



Siège
2 Bd Gambetta
BP 60039
60321 Compiègne cedex
Téléphone :
03 44 92 60 00
Courriel :
cetmef@
developpement-durable.
gouv.fr



www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr

ISBN : 978-2-11-098560-6